

GABRIELI ALVES DE OLIVEIRA

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MISTURA PROTEÍCA RESULTANTE DA
HIDRÓLISE DE SUBPRODUTOS DA INDÚSTRIA FRIGORÍFICA**

CURITIBA

2010

GABRIELI ALVES DE OLIVEIRA

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MISTURA PROTEÍCA RESULTANTE DA
HIDRÓLISE DE SUBPRODUTOS DA INDÚSTRIA FRIGORÍFICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre. Programa de
Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos –
PPGTA – Setor de Tecnologia, Universidade
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Éverton Fernando Zanoelo

CURITIBA

2010

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, que é meu exemplo, meu refúgio, que me guiou desde os primeiros passos e me ensinou que o sabor da conquista é muito melhor quando fazemos algo com o coração.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Éverton, que me mostrou o que é ter dedicação pela pesquisa, pelo esforço, ensinamentos e conselhos durante esses dois anos.

A todos os professores, pelas experiências transmitidas ao longo deste período e que contribuíram para meu desenvolvimento profissional.

A UFPR em especial ao Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Alimentos por propiciar a realização deste sonho, e ao REUNI pelo auxílio financeiro.

A toda minha família, pelo apoio e por acreditarem em mim. Em especial a minha irmã Gra, quem me incentivou através do seu exemplo de dedicação e esforço. A Juliana que mesmo longe me apoiou como se estivesse perto. A Tia Ana, Dora e Neide que me acolheram e souberam compreender minhas angústias e ausências.

Ao Flávio, amigo-irmão que nasceu junto com essa nova etapa, que esteve comigo em todos os momentos. Pelo apoio, pelas risadas, pelas confidências dia após dia. A você o meu carinho e gratidão eternos.

A Aline, Valesca e Marlene que dividiram comigo muito mais que somente a moradia. Compartilharam comigo o nervosismo, as alegrias e as conquistas. Com vocês aprendi muito, contem comigo sempre.

A Cristina, Bruna, pela boa convivência, pelas conversas que me auxiliaram em várias decisões. A Marianne, pela amizade, ao Vitor pelos conselhos e ao Diego pelas risadas.

Ao Rodrigo, pelo carinho, paciência e amor dedicados a mim.

A Deus, o maior dos mestres que sempre esteve e estará a me conduzir.

E a tantos outros que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho, o meu MUITO OBRIGADA.

RESUMO

As indústrias nacionais de processamento de carnes têm destinado recursos para a modernização de equipamentos e tecnologias visando à adoção de processos mais limpos e econômicos. A aplicação de um processo contínuo e simultâneo de evaporação e hidrólise em substituição ao processamento em batelada de subprodutos da indústria frigorífica vem de encontro a esta tendência. Entretanto, um estágio anterior ao de implementação de novos processos que minimize custos e reduza riscos operacionais é o de descrição matemática e simulação computacional da operação investigada, etapas que por sua vez demandam o conhecimento de propriedades termofísicas do material processado. Neste contexto, ensaios experimentais foram realizados com o objetivo de determinar o calor específico, a densidade aparente e a condutividade térmica de mistura protéica obtida por tratamento de subprodutos de indústrias frigoríficas. Análises físico-químicas revelaram que o material investigado apresentava aproximadamente 4% de umidade e 10% de cinzas, porém os teores de proteína (40 a 60%) e principalmente de lipídeos (8 a 25%) variaram significativamente em função da origem (indústria A ou B) do produto. Os ensaios experimentais para determinação do calor específico foram conduzidos em um calorímetro quase-adiabático utilizando o método das misturas. A densidade aparente da mistura protéica foi obtida com o auxílio de um picnômetro. Experimentos de condução de calor unidimensional em regime transiente foram realizados para obtenção de perfis axiais de temperatura em um cilindro feito com o material investigado. Estes dados foram utilizados para ajuste da condutividade térmica através do método simplex de otimização, envolvendo o método de separação de variáveis para solução analítica da equação diferencial parcial que caracteriza a 2ª lei de Fourier. Os valores encontrados para o calor específico, densidade aparente e condutividade térmica a temperatura ambiente, considerando as amostras secas e livres de gordura, foram respectivamente: $366 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 396 kg m^{-3} e $0,038 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. O efeito da fração mássica de água e de lipídeos sobre as propriedades de interesse foi investigado experimentalmente e modelos matemáticos foram propostos para descrever o comportamento observado.

ABSTRACT

The Brazilian meat industry has made investments in modern equipments and technologies to have more economical and less pollutant process. The application of a continuous and simultaneous operation of hydrolysis and evaporation is a cleaner and cheaper alternative to replace the traditional batch operation for processing the great amount of by-products with high contents of protein. However, a first step when suggesting novel processes, which reduces costs and risks but also requires the knowledge of thermophysical properties of the processed material, is the modeling and simulation of the investigated operation. In this framework, a set of experimental runs was carried out to determine the specific heat, apparent density and thermal conductivity of by-products flour obtained by processing the residuals of poultry slaughterhouses. Physico-chemical analyses revealed that moisture content and ash of the investigate material were approximately 4 and 10%, respectively. Instead, the content of protein (40-60%) and mainly lipids (8-25%) were significantly different in the products from the two different meat industries (A or B) considered in this investigation. The experimental method of mixtures and a quasi-adiabatic calorimeter were used to obtain a specific heat close to $366 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. An apparent density equal to 396 kg m^{-3} was experimentally found involving a pycnometer. A thermal conductivity of $0.038 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ was tuned on transient experimental measurements of temperature in a dry bar of by-products flour involving the simplex method of optimization. A dynamic one-dimensional heat transfer model represented by the Fourier 2nd Law involved in this procedure of tuning was analytically solved by the method of separation of variables. The influence of mass fraction of water and fat on the considered thermophysical properties was experimentally investigated and mathematical models were suggested to describe the observed findings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma do processamento da farinha de resíduos por batelada....	20
Figura 2.2 – Fluxograma do processamento contínuo da farinha de resíduos.....	22
Figura 3.1 – Sistema utilizado para determinação do calor específico, onde: 1 representa o calorímetro; 2 termistor devidamente calibrado; 3 leito de temperatura.....	31
Figura 3.2 – Aparato experimental utilizado para determinar a condutividade térmica do material, onde: cilindro de polipropileno; 2 termopares devidamente calibrados; 3 cubo de poliestireno expandido; 4 leitor de temperatura digital.....	35
Figura 4.1 – Caracterização de amostras da farinha do Frigorífico A de diferentes dias de uma semana de produção.....	45
Figura 4.2 – Comparação entre composição centesimal das farinhas da indústria frigorífica A e B.....	46
Figura 4.3 – Comparação entre valores de calor específico reportados na literatura (linha sólida) (MOHSENIN, 1980) e obtidos nesta investigação (símbolos) para produtos com diferentes umidades. 1=amido, 2=milho, 3=lentilha, 4=ervilha desidratada, 5=arroz, 6=soja, 7=cogumelo desidratado, 8=carne de porco gorda, 9=bacon, 10=carne bovina gorda, 11=carne de porco magra, 12=banana, 13=carne bovina magra, 14=batata, 15=alho, 16=maçã, 17=espinafre, 18=morango, 19=alcachofra, 20=cogumelo fresco, 21=cenoura, 22=pepino. Linha tracejada=faixas de umidade em base úmida.....	47
Figura 4.4 – Calor específico da farinha de resíduos <i>in natura</i> com umidade inicial de $3,67 \pm 0,96\%$ (base úmida), lipídeos igual a $13,56 \pm 3,94\%$, proteína entorno de $58,52 \pm 2,06\%$ e $10,08 \pm 0,51\%$ de cinzas. Região sombreada: intervalo de confiança das medidas com 90% de probabilidade.....	48

Figura 4.5 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de calor específico em diferentes frações mássicas de água.....	49
Figura 4.6 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de calor específico em diferentes frações mássicas de gordura.....	50
Figura 4.7 – Efeito da fração mássica de água sobre o calor específico da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de gordura.....	51
Figura 4.8 – Efeito da fração mássica de gordura sobre o calor específico da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água.....	52
Figura 4.9 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de densidade em diferentes frações mássicas de água.....	53
Figura 4.10 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de densidade em diferentes frações mássicas de gordura.....	53
Figura 4.11 – Efeito da fração mássica de água sobre a densidade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de gordura.....	55
Figura 4.12 – Efeito da fração mássica de gordura sobre a densidade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água.....	55
Figura 4.13 – Comparação entre valores de condutividade térmica reportados na literatura (linha sólida) (MOHSENIN, 1980) e obtidos nesta investigação (símbolos) para produtos com diferentes umidades. 1=carne de porco gorda, 2=amido, 3=milho, 4=lentilha, 5=arroz, 6=soja, 7=queijo cheddar, 8=carne de porco gorda, 9=carne bovina magra, 10=banana, 11=batata, 12=cenoura, 13=morango, 14=espinafre, 15=pepino.....	56
Figura 4.14 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de condutividade em diferentes frações mássicas de água.....	57

Figura 4.15 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de condutividade em diferentes frações mássicas de gordura.....	58
Figura 4.16 – Efeito da fração mássica de água sobre a condutividade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de gordura.....	59
Figura 4.17 – Efeito da fração mássica de gordura sobre a condutividade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água.....	60
Figura 4.18 – Temperatura adimensional experimental (símbolos) e calculada (linhas) do cilindro de farinha de resíduos (descrito no capítulo de materiais e métodos) ao longo do tempo de ensaio. (a) umidade=3,7% (base úmida); (b) umidade=61,2% (base úmida).....	61
Figura 4.19 – Temperatura média adimensional ao longo do tempo de amostras de farinha de resíduos com diferentes umidades. Linha contínua (1%) e linha tracejada (99%).....	62
Figura 4.20 – Temperatura adimensional experimental (símbolos) e calculada (linhas) do cilindro de farinha de resíduos (descrito no capítulo de materiais e métodos) ao longo do tempo de ensaio. (a) $x_g=0,255$; (b) $x_g=0,500$	64
Figura 4.21 – Perfil de temperatura média adimensional ao longo do tempo de amostras de farinha de resíduos com diferentes frações mássicas de gordura. Linha contínua (1%) e linha tracejada (99%).....	64
Figura 4.22 - Efeito da fração mássica de água sobre a difusividade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de gordura.....	65
Figura 4.23 – Efeito da fração mássica de gordura sobre a difusividade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Emissão de odor não condensável no processo de cocção por batelada.....	19
Tabela 2.2 – Propriedades Térmicas dos maiores componentes dos alimentos em função da temperatura.....	30
Tabela 4.1 – Valores experimentais e reportados na literatura de calor específico para 4 dentre os 22 diferentes produtos reportados na Figura 4.3.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

- α – difusividade térmica $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;
- A_a – área da água em m^2
- A_f – área da farinha em m^2
- A_g – área da gordura em m^2
- A_s – área da farinha seca em m^2
- A_t – área total em m^2
- C_c – constante do calorímetro em $\text{J}^\circ\text{C}^{-1}$;
- C_{p_a} – calor específico da água em $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- C_{p_f} – calor específico da farinha de resíduos em $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- C_{p_g} – calor específico da gordura em $\text{J Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- C_{p_s} – calor específico da farinha de resíduos seca em $\text{J Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- k_a – condutividade térmica da água em $\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- k_f – condutividade térmica da farinha de resíduos em $\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- k_g – condutividade térmica da gordura em $\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- k_s – condutividade térmica da farinha de resíduos seca em $\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- L – comprimento do cilindro em m;
- M_a – massa da água a temperatura ambiente em kg;
- M_{aq} – massa da água aquecida em kg;
- M_f – massa da farinha em kg;
- M_g – massa da gordura em Kg;
- M_p – massa do recipiente vazio e seco em kg;
- M_s – massa seca em Kg;
- M_t – massa total do picnômetro em kg;
- ρ_a – densidade da água em kg m^{-3} ;
- ρ_f – densidade da farinha de resíduos em kg m^{-3} ;
- ρ_g – densidade da gordura em kg m^{-3} ;
- ρ_l – densidade da água na temperatura do ensaio em kg m^{-3} ;
- ρ_s – densidade da farinha de resíduos seca em Kg m^{-3} ;
- t – tempo de aquecimento em s;
- T_{aq} – temperatura da água aquecida em $^\circ\text{C}$;
- T_{af} – temperatura da água fria em $^\circ\text{C}$
- T_{eq} – temperatura de equilíbrio em $^\circ\text{C}$;
- T_∞ – temperatura ambiente em $^\circ\text{C}$;

T_0 – temperatura inicial do produto em $^{\circ}\text{C}$;

u – diferença entre a temperatura do produto em diferentes tempos e posições e a temperatura do ambiente onde o material foi inserido em $^{\circ}\text{C}$;

V_a – volume da água em m^{-3}

V_f – volume da farinha de resíduos em m^3

V_g – volume da gordura em m^{-3}

V_p – volume interno do picnômetro em m^3 ;

V_s – volume da farinha seca em m^{-3}

V_t – volume total em m^{-3}

X_a – fração Mássica da água

X_g – fração Mássica da gordura

X_s – fração Mássica da farinha de resíduos seca

Z – posição ao longo do cilindro na direção em que ocorre transferência de calor por condução em m ;

y_s – fração mássica da farinha seca em base seca;

y_g – fração mássica da gordura em base seca;

y_a – fração mássica da água em base seca;

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações	10
1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 FARINHA DE RESÍDUOS.....	16
2.1.1 Caracterização, Importância Sócio-Econômica e Impacto Ambiental	16
2.1.2 Processamento Convencional em Batelada.....	19
2.1.3 Processamento Contínuo e Alternativo	21
2.2 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.....	23
2.2.1 Calor específico: Conceito e Métodos de Medida	24
2.2.2 Densidade aparente	25
2.2.3 Condutividade térmica.....	26
2.2.4 Difusividade térmica	27
2.3 MODELOS MATEMÁTICOS.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 EXPERIMENTOS.....	30
3.1.1 Caracterização da Farinha de Resíduos	30
3.1.2 Calor Específico	30
3.1.3 Densidade Aparente.....	33
3.1.4 Condutividade Térmica	34
3.1.5 Difusividade Térmica.....	36
3.2 MODELOS MATEMÁTICOS.....	37
3.2.1 Calor Específico	37
3.2.2 Densidade Aparente.....	38
3.2.3 Condutividade Térmica	39
3.3 SOLUÇÃO DO MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR UNIDIMENSIONAL EM REGIME TRANSIENTE	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA	44
4.2 CALOR ESPECÍFICO	46
4.3 DENSIDADE APARENTE	52
4.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	55
5. CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento da indústria nacional de carnes tem levado o Brasil a ocupar a posição de líder mundial em exportação deste agroproduto (Agra FNP, 2008). Desde 2003 o mercado externo, principal foco da indústria brasileira de carnes, vem crescendo a uma taxa média de 14% ao ano (Agra FNP, 2009). A produção mundial de carne de aves também tem registrado um crescimento acelerado em escala global, porém de maneira heterogênea (MAGDELAINE, 2003). Em especial, países em desenvolvimento como China e Brasil tornaram-se os novos centros de produção e juntos atualmente são responsáveis por aproximadamente 55% do mercado deste produto (WINDHORST, 2003).

Este incremento da produção e crescimento da indústria de abate e processamento de aves gera um inevitável aumento de resíduos. Estima-se que a quantidade de material derivado de aves não consumido por humanos seja de aproximadamente um terço até a metade do total produzido (MEEKER, 2009). Grande parte deste material é processado e resulta em subprodutos conhecidos como farinha de resíduos, que são destinados a ração animal (MEEKER, 2009). O tratamento desta matéria-prima rica em proteína gera uma demanda de energia e uma carga poluente considerável, cujo impacto econômico e ambiental, assim como em outros setores da indústria alimentícia, pode ser minimizado a partir de um maior conhecimento científico sobre o processo (MOURA *et al.*, 2005).

A aplicação deste conceito ao processamento de resíduos envolve a modelagem e simulação de um processo contínuo e simultâneo de hidrólise e evaporação em múltiplos estágios. Esta técnica alternativa de processamento, se implementada, teoricamente reduziria a emissão de poluentes e os custos de operação, devido ao excessivo consumo de energia. A vantagem deste método de tratamento dos resíduos é atribuída à transferência de calor latente da água ao sistema e a condensação dos vapores gerados em estágios anteriores. Entretanto, as propriedades termofísicas do material investigado, requeridas na solução dos balanços de massa e energia que descrevem este processo alternativo, são inexistentes na literatura. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é determinar experimentalmente o calor específico, densidade aparente e condutividade térmica da farinha de resíduos. A obtenção de expressões matemáticas que permitam a estimativa destas propriedades em função dos

principais constituintes, para posterior inserção das mesmas em códigos de cálculo que simulem o processo alternativo é também uma meta importante a ser atingida.

A presente dissertação é dividida em capítulos, que tratam essencialmente: *i)* da descrição de algumas características da farinha de resíduos e definição das propriedades termofísicas investigadas, juntamente com métodos experimentais mais utilizados e modelos matemáticos desenvolvidos por diferentes autores (2. Revisão Bibliográfica); *ii)* das metodologias e procedimentos utilizados para determinação das propriedades investigadas e do desenvolvimentos dos modelos matemáticos (3. Materiais e Métodos); e *iii)* da apresentação dos resultados de calor específico, densidade aparente e condutividade térmica da farinha de resíduos de aves obtidos experimentalmente e calculados (4. Resultados e Discussões).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será inicialmente apresentada uma breve descrição sobre as características da farinha de resíduos, importância sócio-econômica, impacto ambiental e processamento. Este último tópico será particularmente detalhado visto que as propriedades termofísicas exploradas neste trabalho são fundamentais para dimensionamento, modelagem e simulação de operações alternativas envolvidas no tratamento de resíduos da indústria de carnes. Definições de calor específico, densidade, condutividade e difusividade térmica, assim como métodos experimentais e modelos matemáticos de determinação destas propriedades também serão reportados.

2.1 FARINHA DE RESÍDUOS

2.1.1 Caracterização, Importância Sócio-Econômica e Impacto Ambiental

Os subprodutos de abates de animais podem ser classificados como comestíveis e não comestíveis. Os primeiros são diretamente destinados à alimentação humana (*in natura* e semiprocessados) ou para a produção de derivados. Subprodutos não comestíveis são todos aqueles envolvidos em aplicações distintas da citada anteriormente, como por exemplo, produção de farinhas para ração animal, cosméticos e farmacêuticos (CANHOS e DIAS, 1983).

De acordo com a agência nacional de vigilância sanitária (norma nº 343, de 04 de novembro de 1996, artigo 95) entende-se por farinha de resíduos o subproduto seco e triturado, obtido pelo cozimento a seco de recortes em geral, aparas e resíduos de limpeza, decorrentes das diversas operações envolvidas na planta. Em uma etapa anterior ao processamento, os resíduos são representados por uma mistura de ligamentos, mucosas, fetos e placentas, orelhas e ponta de cauda, órgãos não comestíveis, carnes rejeitadas pela inspeção estadual, sangue e ossos. Em função do destino convencional do produto, a legislação define que a farinha de resíduos processada deve conter no mínimo 40% de proteínas.

Os subprodutos apresentam grande variação de composição de nutrientes e qualidade protéica (WANG e PARSONS, 1997), essencialmente devido ao tipo de processamento, porém em geral são ricos em proteína, cálcio e fósforo, e deficientes

em diversos aminoácidos, como metionina, lisina e cistina (BAKER *et al.*, 1981). De acordo com os limitados dados disponíveis na literatura (BROWN *et al.*, 2002), a composição centesimal da farinha de resíduos é de aproximadamente 52% de proteína, 23% de cinzas, 11,0% de lipídeos e 3,4% de umidade.

Devido ao crescimento significativo da indústria avícola (WINDHORST, 2003; MAGDELAINE, 2003; UEKI, 2006), uma grande quantidade de farinha de resíduos tem sido gerada com potencial para ser uma importante fonte protéica para a produção de ração animal (MEEKER, 2009). Estima-se que para cada tonelada de carne preparada para o consumo humano, cerca de 300 Kg são descartados como produtos não comestíveis, sendo que deste montante aproximadamente 200 Kg se transformam em farinha de carne (LESSON e SUMMERS, 1997). Considerando-se todos os produtos derivados de aves, inclusive a carne, calcula-se que a quantidade de matéria não consumida por humanos seja de aproximadamente um terço até a metade do total produzido (MEEKER, 2009). Em outros setores da indústria frigorífica nacional a situação de geração de resíduos é equivalente a das unidades produtoras de carnes de aves, uma vez que aproximadamente 40% da produção total de carnes transformam-se em produtos não comestíveis e recicláveis (farinhas e gordura animal) (BELAVER, 2001). Em termos econômicos, em função da quantidade produzida e devido a questões mercadológicas o preço da farinha de resíduos é relativamente baixo. Apesar disto, assume-se que no Brasil os resíduos da indústria frigorífica gerem riquezas da ordem de R\$ 2 bilhões por ano, sendo que grande parte desse valor é agregado na indústria de rações, a qual movimenta cerca de R\$ 10 bilhões/ano (BELAVER, 2001).

Como todo processo industrial, as graxarias (local onde é processada a farinha de resíduos) apresentam potencial gerador de poluentes, convivendo com as dificuldades naturais de controlá-los. Embora os resíduos sólidos praticamente inexistam, pois são aproveitados e utilizados na obtenção de farinhas ou adubos, e os líquidos possam ser controlados com razoável facilidade por processos físico-químicos e biológicos, os poluentes gasosos necessitam de grande atenção e controle (BARROS, 2007). Este fato ocorre devido a formação de odores desagradáveis, resultados da emissão de vários compostos voláteis inorgânicos e orgânicos, característicos de processos que envolvem a decomposição de material graxo e tecido animal (BARROS, 2007). Embora estes compostos emergentes dos digestores industriais sejam considerados poluentes não tóxicos, devido ao

incômodo que provocam nas populações humanas circundantes aos abatedouros, o propósito básico do tratamento destes gases é de reduzir sua emissão a um nível que resulte na sua não percepção. De acordo com a literatura (SELL, 1992), sem o devido controle os odores podem ser percebidos em um perímetro superior a 32 km, gerando reclamações consideráveis das populações atingidas. Os sintomas mais graves gerados pela percepção destes odores envolvem náuseas e insônia (WARK e WARNER, 1976).

As principais fontes dos odores em uma unidade de abate e processamento de resíduos, em ordem crescente de concentração de odores, são as áreas de transferência das carcaças para os silos de armazenamento, as zonas de transporte de sebo para depósito e as unidades de cocção dos resíduos (BARROS e LICCO, 2000). Em particular, a Tabela 2.1 mostra a emissão de odores durante um ciclo de digestão de resíduos por batelada (PROKOP, 1992). As medidas de concentração de orgânicos totais foram realizadas em função da temperatura de cozimento. A sigla TRDNP denota a taxa requerida de diluição para não percepção de odor.

Tabela 2.1 – Emissão de odor não condensável no processo de cocção por batelada.

Tempo de cozimento (h)	Temperatura (°C)	Concentração (ppm)	TRDNP
0,25	65	-	-
0,5	104	180	40000
1	118	1000	45000
1,5	120	700	97000
2	120	400	75000
2,5	120	260	93000
3	120	200	127000

Apesar do longo histórico de problemas decorrentes de poluição em graxarias, plantas modernas de processamento têm reduzido este impacto por simples manipulação da temperatura de cocção. Temperaturas de cozimento por volta de 150°C proporcionam uma aceleração na ruptura dos tecidos celulares dos resíduos, liberando gases e vapores através de decomposições químicas,

ocasionando maior formação de substâncias odoríferas. Por este motivo os processos modernos evitam trabalhar com temperaturas superiores a 140°C (PROKOP, 1992).

2.1.2 Processamento Convencional em Batelada

As fábricas de subprodutos de origem animal ou graxarias são unidades industriais destinadas a processar resíduos não aproveitáveis para alimentação humana (BARROS, 2007). A Figura 2.1 reporta um fluxograma clássico do processamento de vísceras e óleos em uma graxaria (FERROLI *et al.*, 1997).

O primeiro estágio do processamento é a fragmentação tanto das vísceras quanto dos ossos. Este procedimento permite a obtenção de uma mistura mais homogênea nos digestores, bem como o aumento das superfícies de contato, o que promove uma melhor extração da gordura pela exposição ao calor (FERROLI *et al.*, 1997). Segundo a literatura (PARDI *et al.*, 1996), quando possível, é aconselhável processar os ossos e tecidos de ligamentos em separados, a fim de evitar a formação de material demasiadamente viscoso e com característica de pasta.

A hidrólise das proteínas acontece durante uma operação de cocção ou fritura das vísceras e é realizada em um equipamento denominado digestor, que nada mais é do que um vaso onde é depositada a matéria a ser processada. Esta etapa do processamento pode ser realizada por via úmida ou seca. No primeiro caso o vapor para aquecimento dos resíduos, proveniente de uma caldeira, é alimentado diretamente no interior do vaso. Na segunda situação, o vapor circunda uma camisa externa de aquecimento, o que provoca a desidratação do produto e a liberação de gordura (GUNSTONE e NORRIS, 1983). O digestor opera sob pressão e é dotado de um eixo giratório que mantém o produto em constante movimento. Após um certo tempo de residência sob condições definidas de temperatura e pressão, a víscera encontra-se hidrolisada. O material resultante é transportado para uma caixa percoladora onde se separa o óleo do material pastoso, o qual é posteriormente alimentado em prensas e secadores (PROKOP, 1992).

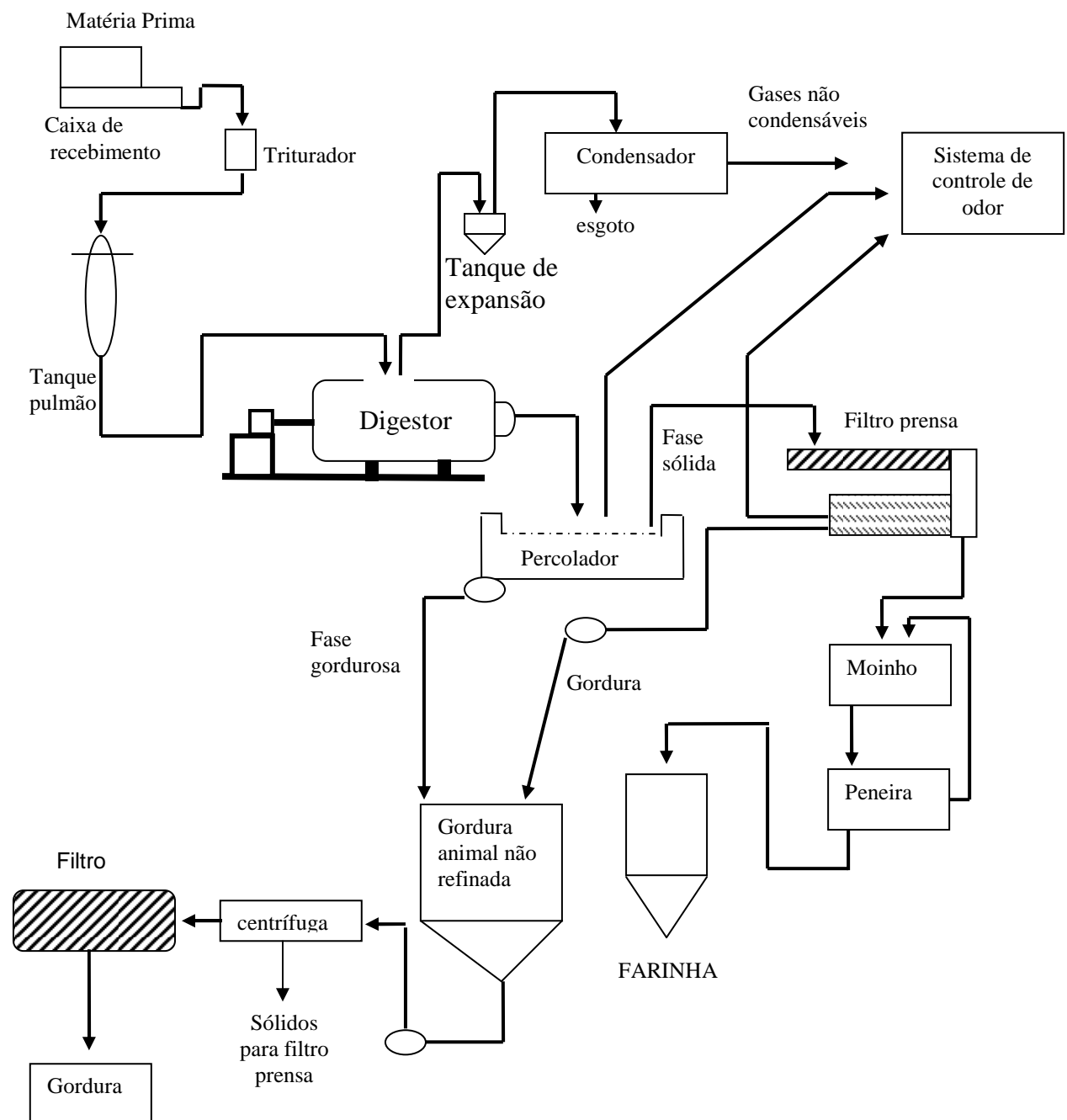


Figura 2.1 – Fluxograma do processamento da farinha de resíduos por batelada

Ferrolí *et al.* (1997) afirmam ainda que para fábricas de grande porte são adotados geralmente três digestores com capacidade de 5.000 litros cada. Nestas condições, o processamento de 150.000 aves por dia envolve aproximadamente 20 cargas. Considera-se que a carga é composta por vísceras (que representam 10,38% do peso da ave viva), os pulmões (1,2% do peso das aves), os ossos resultantes da carne mecanicamente separada (CMS) (11,2% do peso das aves) e

mais 20% dos 2.500 litros da carga do digestor compostos do óleo vindo dos tanques decantadores.

2.1.3 Processamento Contínuo e Alternativo

Evoluções do processo convencional de tratamento de resíduos da indústria de carne foram propostas com o objetivo de torná-lo mais simples, econômico e eficiente. Um destes maiores avanços reportados na literatura (USEPA, 1995) tem sido a implementação de processos contínuos. Embora existam diferenças significativas entre os sistemas contínuos e em batelada, ambos são baseados nas operações de moagem, digestão e prensagem. Dentre as principais vantagens do processo contínuo destaca-se o menor exposição da matéria-prima ao calor, o menor espaço físico de instalação e menor consumo de energia. Outro aspecto positivo da operação contínua é a facilidade de automatização, o que proporciona um controle efetivo da relação temperatura, tempo de residência e carga do digestor (THE BSE INQUIRY, 2000).

No processo contínuo tradicional, a matéria prima é pré-condicionada em trituradores contínuos, antes de ser encaminhada ao sistema de cocção. Na cocção normalmente utiliza-se um digestor cilíndrico horizontal encamisado, equipado com dispositivos que realizam a progressão contínua da matéria prima (USEPA, 2005). O digestor é aquecido com vapor indireto, o que eleva a temperatura da mistura, formada por uma torta sólida e um líquido gorduroso, a temperaturas entre 121 e 137°C (RENDERES, 2006). Do digestor o material é descarregado em drenos que tem a mesma função do percolador (USEPA, 1995). A fase sólida é prensada para a retirada da gordura remanescente, sendo o restante do processo semelhante ao batelada (PROKOP, 1992). A Figura 2.2 demonstra um fluxograma típico de uma graxaria utilizando um digestor contínuo (RENDERES, 2004).

sendo estes últimos mais eficientes, eliminando o dobro de líquidos com a mesma quantidade de vapor (OCKERMAN e HANSEN, 1994).

Outro sistema reportado na literatura utilizava um pré-aquecedor seguido de uma prensa de rosca gêmea, onde a torta era direcionada ao digestor. O líquido gorduroso por sua vez era enviado a um evaporador operando a vácuo e a uma temperatura entre 70 e 90°C, novamente aquecido pelos vapores provenientes do digestor. Neste sistema, a água evaporada do líquido gorduroso era condensada e os gases não condensáveis enviados a tratamento adequado. O líquido gorduroso sem umidade era enviado ao digestor juntamente com uma torta sólida. Deste momento em diante o processo era semelhante aos demais (USEPA, 1995).

A aplicação do processamento contínuo em substituição ao tratamento convencional de resíduos em batelada tem sido sugerida na literatura (LICCO e BARROS, 2000). As principais motivações para esta alteração, as quais haviam sido apontadas no capítulo de introdução deste trabalho, são de que o processamento contínuo permite maior controle da digestão, além de ser mais econômico e proporcionar um maior confinamento dos gases formados no processo.

2.2 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

As informações reportadas acima acerca do tratamento contínuo de resíduos da indústria de carnes evidenciam que geralmente uma etapa de evaporação em estágio simples ou múltiplos é envolvida no processamento. O dimensionamento, modelagem e simulação desta operação demandam o conhecimento do calor específico do material processado, a fim de estimar a entalpia destas soluções, as quais são envolvidas nos balanços de energia (BLACKADDER e NEDDERMAN, 1982). A densidade por sua vez é uma propriedade elementar que pode ser requerida em balanços de massa em diferentes etapas de processamento da matéria-prima, como por exemplo, o transporte em roscas helicoidais da farinha de resíduos, usualmente envolvidas na operação contínua. A condutividade térmica é importante para estimativa de coeficientes convectivos internos aos equipamentos e para posterior cálculos dos coeficientes globais de troca térmica, os quais são demandados em qualquer operação de transferência de calor, seja para fins de dimensionamento ou simulação de modelos matemáticos (KERN, 1980).

2.2.1 Calor específico: Conceito e Métodos de Medida

O calor específico é entendido como a quantidade de calor necessária para alterar a temperatura de um corpo em 1°C por unidade de massa, sem mudança de estado (BORÉM *et al.*, 2002). Neste sentido, é um importante parâmetro termodinâmico para determinação da quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento de alimentos (ARAUJO *et al.*, 2004).

O calor específico é principalmente afetado pela quantidade de água presente no alimento e pelo estado físico desta água (LEWIS, 1993). Entretanto é também significativamente influenciado pela composição e estrutura do material (SINGH e HELDMAN, 1993). Em alimentos, o efeito da umidade e temperatura é extensivamente reportado na literatura e via de regra o aumento destes fatores provoca um incremento desta propriedade (SWEAT, 1986).

Kazarian e Hall (1965) têm reconhecido a dificuldade de se medir o calor específico de materiais biológicos de forma precisa. Embora atualmente a disponibilidade de dados seja muito maior do que na década de 70, as dificuldades encontradas nos primeiros métodos de determinação, as quais certamente foram minimizadas, ainda são a principal causa da limitada quantidade de dados encontrada na literatura.

Existem inúmeros métodos consolidados de determinação do calor específico (MOHSENIN, 1980; KAMAL, 1982; VALENTAS *et al.*, 1997), porém todos envolvem um calorímetro, e em geral baseiam-se no equilíbrio térmico estabelecido entre um primeiro corpo, do qual se pretende determinar o calor específico, e um segundo corpo de calor específico conhecido. Dentre os métodos reportados na literatura o mais moderno (VALENTAS *et al.*, 1997) é usualmente conhecido como DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) ou calorímetro diferencial de varredura, porém o mais frequentemente aplicado é o método das misturas (KAZARIAN e HALL, 1965; MOHSENIN, 1980; SASSERON, 1984; VALENTAS *et al.*, 1997). De modo simplificado, este último método consiste no emprego de um recipiente isolado (calorímetro) de capacidade calorífica conhecida, onde é adicionado um líquido inerte com massa conhecida e temperatura diferente da amostra de material cujo valor de calor específico deseja-se encontrar (KAZARIAN e HALL, 1965; MOHSENIN, 1980).

Devido a complexidade do aparato, as unidades de DSC são comerciais e envolvem custos consideráveis, o que tem contribuído para uma utilização relativamente restrita desta técnica, apesar da maior precisão da medida resultante. Contudo, exemplos de aplicação envolvendo este equipamento são extensivamente reportados na literatura (KARUNAKAR *et al.*, 1998; BAIK *et al.*, 1999).

Métodos alternativos para determinação de calor específico também têm sido propostos. Por exemplo, de acordo com Simões (1997), Hwang e Hayakawa desenvolveram uma metodologia para determinar o calor específico de alimentos onde não há contato direto da amostra com o líquido de capacidade calorífica conhecida. Este método pode ser aplicado para determinar o calor específico de alimentos altamente higroscópicos. Desta forma, o calor de absorção e algumas reações químicas que poderiam ocorrer são eliminados.

2.2.2 Densidade aparente

Existem três tipos de densidade, quando se trata de alimentos; densidade real, densidade aparente e densidade do leito ou bulk. O valor desses diferentes tipos de densidade dependerá de como os espaços entre os poros serão considerados (SINGH e HELDMAN, 1993).

A densidade real é a razão entre a massa e o volume real do produto (SINGH e HELDMAN, 1993). Usualmente os alimentos apresentam densidades reais da ordem de 1400 a 1600 kg m⁻³, exceto aqueles com alto teor de gordura e sal (PELEG, 1993). A densidade do leito é definida como a relação entre uma certa massa de partículas e o volume de um leito onde as mesmas encontram-se de alguma forma empacotadas. Nesta medida os espaços vazios entre as partículas e os poros internos são considerados no volume total do material (SINGH e HELDMAN, 1993). A densidade aparente, a ser determinada nesta investigação, representa a massa da amostra por unidade de volume aparente da amostra, incluindo o volume interno de poros (MOHSENIN, 1980; RAPUSAS *et al.*, 1995). Este parâmetro é vital no projeto, modelagem e otimização de processos da indústria alimentícia, pois tem efeito direto nas propriedades físicas do alimento (RAHMAN, 2005).

Os métodos para determinação de densidade são essencialmente de tipo hidrométrico e picnométrico (VALENTAS *et al.*, 1997). O primeiro é baseado no

princípio de Archimedes e por esta razão é também conhecido como método da força de empuxo. Embora detalhes deste procedimento possam ser obtidos na literatura (RAHMAN, 1995; VALENTAS *et al.*, 1997), convém mencionar que as maiores incertezas decorrentes de sua aplicação são: *i*) a troca de material sólido, líquido e gasoso entre a amostra e o líquido; e *ii*) a flotação parcial da amostra. De qualquer forma, o método mais utilizado para determinação desta propriedade física é o de deslocamento de fluido. Inúmeros produtos agrícolas e alimentícios tais como trigo, milho, cevada, arroz (KARIMI, 2009), amido e creme de leite (MOURA *et al.*, 2001; CANSEE *et al.*, 2008) foram determinados por esta técnica envolvendo deslocamento de diferentes líquidos em picnômetro, como por exemplo, tolueno e água. O método parece não ser recomendado para produtos que apresentem altas concentrações de sólidos solúveis (QUEIROZ, 2001).

2.2.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica de um material, de acordo com Rao e Rizvi (2005), é a medida da sua capacidade de conduzir calor. No caso de condução unidimensional de calor, a equação proposta por Fourier (WELTY *et al.*, 1984) é conhecida como a equação fundamental de transferência de calor.

A condutividade térmica depende da composição do produto (STOLF, 1972; RAHMAN *et al.*, 1997), principalmente da umidade, incluindo a presença de espaços vazios e do grau de homogeneidade estrutural (ARAUJO *et al.*, 2004). Classicamente esta propriedade decresce com a redução do percentual de água no produto investigado. Frequentemente um modelo linear descreve adequadamente a relação entre a condutividade e a umidade em base úmida, porém segundo alguns autores esta dependência é limitada a uma pequena faixa de variação do fator considerado (MOHSENIN, 1980; SWEAT, 1986). Além da água, a incorporação de ar na fase de processamento também afeta a condutividade (RAHMAN *et al.*, 1997). De modo geral, pode-se afirmar que a condutividade térmica de alimentos depende tanto da sua composição, como de qualquer fator que afeta o fluxo de calor através do material, tal como: a porosidade, a forma, o tamanho, o arranjo dos poros, a orientação das fibras em carnes congeladas etc (SWEAT, 1986).

Para determinar a condutividade térmica de materiais alimentícios existem numerosas técnicas que são divididas em três grandes grupos: as técnicas de

medição em estado estacionário, as técnicas de medição em estado semi-estacionário e as técnicas em estado transiente (MOHSENIN, 1980; KAMAL, 1982; VALENTAS *et al.*, 1997).

O método de medição de condutividade térmica em regime estacionário oferece como vantagem a simplicidade das equações matemáticas e o alto grau de controle das variáveis experimentais que geram resultados bastantes precisos (REIDY e RIPPEN, 1971; MOHSENIN, 1980). No entanto, esta técnica não é recomendável para materiais biológicos, principalmente devido ao longo período de tempo necessário para atingir o regime estacionário, possibilitando modificações significativas no teor de água do produto (VALENTAS *et al.*, 1997).

Um método transiente utilizado previamente para determinar a condutividade térmica de alimentos é o de placa quente protegida (QUEIROZ, 2001). O aspecto negativo deste procedimento é que o mesmo envolve experimentos longos. Neste método uma amostra fica envolvida por uma fonte de calor, com as extremidades isoladas. O valor de k pode ser calculado a partir de medidas da quantidade de calor fornecida para a amostra, temperaturas interna e externa e espessura da amostra. Não obstante seja recomendado somente para alimentos desidratados, é frequentemente aplicado devido a sua simplicidade (REIDY e RIPPEN, 1971).

A condutividade térmica de vários alimentos também tem sido determinada com o método experimental de sonda com aquecimento (REIDY e RIPPEN, 1971; SINGH, 1982; BORÉM, 2002; RESENDE, 2002; SARRIA e HONÓRIO, 2004; ANDRADE *et al.*, 2004; CORREA *et al.*, 2004; RIBEIRO *et al.*, 2007). A sonda geralmente é construída com uma agulha de tamanho conhecido, a qual é acoplada a uma resistência de aquecimento (níquel-cromo), juntamente com um pequeno termopar localizado exatamente no centro da sonda. Todos estes componentes são cuidadosamente isolados, geralmente com resina epóxi. Uma taxa de aquecimento linear é aplicada à resistência por passagem de uma corrente de baixa intensidade e o aumento da temperatura é registrado através do sistema de aquisição de dados, a cada tempo determinado.

2.2.4 Difusividade térmica

A difusividade térmica é definida como a relação entre a condutividade térmica e o calor específico do produto multiplicado por sua massa específica. A

difusividade térmica é descrita ainda como a razão entre a habilidade em transferir calor e a capacidade de armazenar calor em situações em que a transferência de calor ocorre em regime transiente (GUMERATO *et al.*, 2007).

A maior parte dos dados de difusividade térmica disponível na literatura foi gerada a partir do conhecimento do calor específico, densidade e condutividade térmica do material. Entretanto, em determinados casos os valores desta propriedade foram determinados diretamente a partir de resultados experimentais (MOURA, 2001; SIMÕES e MURR, 2000; ARAUJO *et al.*, 2004).

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS

Equações confiáveis para predição de propriedades termofísicas, baseados na composição e estado do material, são ferramentas extremamente importantes (KALENTUC, 2007).

Uma vasta variedade de regras de misturas para determinação de calor específico de materiais biológicos em função da umidade (LAMB, 1976; SIEBEL, 1982), da composição do alimento (CHARMI, 1971; HELDMAN e SINGH, 1981; HELDMAN, 2001; LOZANO, 2005) e da temperatura (CHOI e OKOS, 1986) são disponíveis na literatura. Frequentemente expressões são propostas combinando os fatores acima evidenciados (WHEELLOCK e LANCASTER, 1970; RIEDEL, 1978). Apesar da disponibilidade destas equações é preciso ressaltar que as mesmas são frequentemente válidas em faixas limitadas de variação dos fatores e específicas para determinados alimentos (CHOI e OKOS, 1983; PEACOCK, 1995; VIEIRA, 1996).

As equações para cálculo da densidade de alimentos apresentam-se de modo semelhante às de calor específico, ou seja, a propriedade é dependente da composição (CHOI e OKOS, 1983) e temperatura, por exemplo. Em geral também tem aplicação limitada a determinados produtos (SHORT, 1955; PHIPPS, 1969; CHOI e OKOS, 1983).

O mesmo acontece para equações de condutividade e difusividade térmica (RIEDEL 1949; RIEDEL, 1978; SWEAT, 1974; CHOI e OKOS, 1986).

A Tabela 2.2 apresenta a variação do calor específico, densidade e condutividade térmica de cada um dos principais constituintes de alimentos convencionais em função da temperatura (CHOI e OKOS, 1986). Estas equações

permitem a aplicação das regras de mistura mencionadas anteriormente para estimativa das propriedades investigadas em função da umidade, composição e temperatura.

Tabela 2.2 – Propriedades Térmicas dos maiores componentes dos alimentos em função da temperatura

Propriedade	Componentes	Equação	Nº da Equação
Cp (KJ Kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Carboidrato	$C_p = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} T - 5,9399 \times 10^{-6} T^2$	2.1
	Cinzas	$C_p = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3} T - 3,6817 \times 10^{-6} T^2$	2.2
	Fibras	$C_p = 1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3} T - 4,6509 \times 10^{-6} T^2$	2.3
	Gordura	$C_p = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3} T - 4,8008 \times 10^{-6} T^2$	2.4
	Proteínas	$C_p = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3} T - 1,3129 \times 10^{-6} T^2$	2.5
	Água	$C_{p1} = 4,0817 - 5,3062 \times 10^{-3} T + 9,9516 \times 10^{-4} T^2$ ($-40 < T < 0^\circ C$) $C_{p2} = 4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5} T + 5,4731 \times 10^{-6} T^2$ ($0 < T < 150^\circ C$)	2.6
ρ (Kg m ⁻³)	Carboidrato	$\rho = 1,5991 \times 10^3 - 0,31046T$	2.7
	Cinzas	$\rho = 2,4238 \times 10^3 - 0,28063T$	2.8
	Fibras	$\rho = 1,3115 \times 10^3 - 0,36589T$	2.9
	Gordura	$\rho = 9,2559 \times 10^2 - 0,41757T$	2.10
	Proteínas	$\rho = 1,3299 \times 10^3 - 0,51840T$	2.11
	Água	$\rho = 997,18 + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^2$	2.12
k (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Carboidrato	$k = 0,20141 + 1,3874 \times 10^{-3} T - 4,3312 \times 10^{-6} T^2$	2.13
	Cinzas	$k = 0,32962 + 1,4011 \times 10^{-3} T - 2,9069 \times 10^{-6} T^2$	2.14
	Fibras	$k = 0,18331 + 1,2497 \times 10^{-3} T - 3,1683 \times 10^{-6} T^2$	2.15
	Gordura	$k = 0,18071 + 2,7604 \times 10^{-4} T - 1,7749 \times 10^{-7} T^2$	2.16
	Proteínas	$k = 0,17881 + 1,1958 \times 10^{-3} T - 2,7178 \times 10^{-6} T^2$	2.17
	Água	$k = 0,57109 + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,7036 \times 10^{-6} T^2$	2.18

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas detalhadamente as metodologias e equipamentos envolvidos na caracterização físico-química e na obtenção das propriedades termofísicas investigadas. Os procedimentos adotados para proposta de modelos matemáticos com o objetivo de descrição do efeito da umidade e teor de lipídeos sobre o calor específico, densidade aparente e condutividade térmica também serão reportados e explicados. Por último, será demonstrado o método de solução do modelo de transferência de calor utilizado na estimativa da condutividade térmica.

3.1 EXPERIMENTOS

3.1.1 Caracterização da Farinha de Resíduos

As amostras de farinha de resíduos utilizadas para a realização deste trabalho foram obtidas junto a duas unidades de abate de aves (*A* e *B*), localizadas no estado do Paraná. Diferentes sistemáticas de obtenção das amostras foram adotadas nos frigoríficos *A* e *B*. Na indústria *A* foram obtidas amostras diárias durante uma semana de operação da unidade de produção de farinha de vísceras. Este procedimento foi utilizado para que as análises pudessem revelar eventuais diferenças do produto em diferentes turnos de operação, o que poderia caracterizar variações na alimentação nos digestores, ou problemas de padronização de procedimentos na unidade de farinha. No caso da unidade *B*, o material era oriundo de um único lote de processamento de vísceras e foi utilizado com o exclusivo propósito de fornecer amostras para os ensaios de determinação das propriedades termofísicas investigadas. Independentemente da origem, assim que recebidas, as amostras foram acondicionadas sob refrigeração e em seguida submetidas a análises físico-químicas para caracterização da umidade, cinzas, proteínas e lipídeos. Normas definidas pelo Instituto Adolfo Lutz (2004) foram adotadas nestes ensaios. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.1.2 Calor Específico

Para a determinação do calor específico da farinha de resíduos utilizou-se o método de mistura calorimétrica (MOHSENIN, 1980; SASSERON, 1984; VALENTAS *et al.*, 1997; ZANOELO *et al.*, 2010), que consiste no emprego de um recipiente isolado (calorímetro) de capacidade calorífica conhecida contendo água a uma temperatura e massa também conhecidas.

O calorímetro é basicamente um cilindro de vidro prateado separado de outro cilindro por ar a uma pressão relativa negativa (vácuo). O dispositivo, que é considerado quase adiabático, apresenta um volume de aproximadamente 250 mL. Um leitor de temperatura (WATLOW, modelo SD31), com sensor do tipo termistor previamente calibrado foi utilizado para medidas de temperatura de amostras de farinha e água utilizadas nos ensaios. A calibração do termistor foi realizada por leituras simultâneas de temperatura de uma massa d'água envolvendo o referido sensor e um termômetro de referência (THERMO SCIENTIFIC ERTCO THERMOMETER, modelo 15-059-15). A Figura 3.1 apresenta de forma simplificada o calorímetro e os sensores envolvidos na medida desta propriedade.

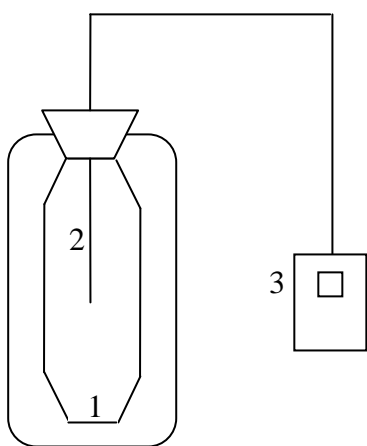


Figura 3.1 – Sistema utilizado para determinação do calor específico, onde: 1 representa o calorímetro; 2 termistor devidamente calibrado; 3 leitor de temperatura.

Em cada ensaio a ser realizado para determinação do calor específico do produto, perde-se certa quantidade de calor para o recipiente. Para se estimar esta quantidade de calor perdido, determinou-se a constante do calorímetro. Basicamente o procedimento para obtenção desta constante envolve a mistura ao interno do calorímetro de duas massas conhecidas de água a diferentes temperaturas iniciais (faixa de temperatura utilizada nos experimentos). Um balanço

de energia em uma condição de equilíbrio no calorímetro permite o cálculo da capacidade térmica aparente do recipiente, como demonstrado matematicamente na Equação (3.1):

$$C_c = \frac{M_{aq} C_{p_a} (T_{aq} - T_{eq}) + M_a (T_{af} - T_{eq})}{(T_{eq} - T_{af})} \quad (3.1)$$

onde, C_c é a constante do calorímetro em $J^\circ C^{-1}$; M_{aq} é a massa da água aquecida em kg ; C_{p_a} é o calor específico da água em $J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$; T_{aq} temperatura da água aquecida em $^\circ C$; T_{eq} temperatura de equilíbrio em $^\circ C$; M_a massa da água a temperatura ambiente em kg e T_{af} representa temperatura da água fria em $^\circ C$.

A etapa de determinação do calor específico da farinha também envolveu o método das misturas. Entretanto, nesta situação uma certa massa de produto (M_f), com temperatura inicial conhecida (T_0), foi transferida para o calorímetro com capacidade térmica aparente previamente determinada ($C_c = 144,6 J^\circ C^{-1}$), o qual encontrava-se a temperatura ambiente (T_∞). O restante do volume do recipiente foi preenchido com uma quantidade de água aquecida (M_{aq}), cuja temperatura de alimentação havia sido pré-determinada (T_{aq}). O líquido e o sólido contidos no calorímetro foram agitados vigorosamente a fim de que houvesse uma mistura perfeita destas massas. A temperatura interna do calorímetro passou então a ser monitorada em diferentes posições, para que a inexistência de gradientes de temperatura fosse confirmada, até a obtenção de um estado de equilíbrio caracterizada por uma temperatura (T_{eq}). De forma análoga a Equação (3.1), na determinação do calor específico da farinha assumiu-se que todo o calor cedido pelo líquido havia sido transferido para o material seco, para a água contida no produto e para aquecimento do recipiente, como definido na Equação (3.2):

$$C_{p_f} = \frac{M_{aq} C_{p_a} (T_{aq} - T_{eq}) - C_c (T_{eq} - T_\infty)}{M_f (T_{eq} - T_0)} \quad (3.2)$$

Foram realizados testes preliminares com outros alimentos, tais como banana, amido, maçã e arroz sólidos, cujos valores de calor específico encontram-se bem definidos na literatura (STANLEY e CHARM, 1971; HELDMAN, 1975;

MOHSENIN, 1980; RIBEIRO, 2002; HELDMAN, 2007). Para cada produto foram realizados 10 testes, sendo que os produtos foram escolhidos em função das diferentes umidades *in natura*. Estes experimentos foram conduzidos para validação do procedimento experimental de determinação do calor específico e dos equipamentos e sensores envolvidos.

Após calibração e validação do aparato experimental foram realizados ensaios para verificar o efeito das frações mássicas de umidade e gordura sobre o calor específico da farinha de resíduos. Em particular foram conduzidos 23 experimentos com variação de umidade entre 1,02 a 90,37% (base úmida) e de lipídeos entre 1,35 a 80%. Nestes ensaios os constituintes (água e farinha) e (gordura e farinha) foram misturados de forma a obter uma massa homogênea antes de serem alimentados no calorímetro a temperatura ambiente. A gordura utilizada foi obtida na etapa de prensagem do processamento dos resíduos da unidade de abate de aves B. A umidade e o teor de gordura inicial no produto foram considerados na estimativa das frações mássicas finais destes constituintes. Todos os testes foram realizados em triplicata.

3.1.3 Densidade Aparente

A densidade da farinha de resíduos foi determinada pelo método de deslocamento de fluido em picnômetro, segundo norma nº 985.19 da AOAC. O picnômetro foi previamente calibrado com água destilada, o que revelou um volume interno igual à $5,405 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (V_p). A massa do recipiente vazio e seco também foi previamente determinada ($M_p = 0,0221774 \text{ kg}$).

O procedimento adotado consistiu em inserir no picnômetro uma massa conhecida do produto (M_f) com umidade também conhecida e preencher o espaço vazio com água a temperatura ambiente. A massa total do picnômetro contendo água (M_t) foi determinada em cada experimento. A massa de água no picnômetro foi calculada subtraindo-se da massa total do picnômetro (M_t), a massa da farinha (M_f) e a massa do recipiente vazio e seco (M_p). O volume equivalente a esta massa de água é facilmente estimado a partir da razão da massa de água que restou no recipiente e a densidade da água na temperatura do ensaio (ρ_l).

O volume de cada amostra foi finalmente determinado pela diferença entre o volume do recipiente e o volume de água contida no recipiente juntamente com a

amostra. A Equação (3.3) representa resumidamente a metodologia de cálculo da densidade do produto com umidade especificada.

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_p - \left(\frac{M_t - M_f - M_p}{\rho_l} \right)} \quad (3.3)$$

Um conjunto de 18 experimentos foi proposto para estabelecer a relação entre a umidade bem como entre o conteúdo de gordura e a densidade aparente da farinha. Os extremos do intervalo de variação do primeiro fator são idênticos aos utilizados nos ensaios realizados com o objetivo de determinar o calor específico. Entretanto, a influência do teor de gordura foi investigada desde 1,35 até o limite de 90% deste constituinte. Assim como no caso da propriedade anterior, as misturas preparadas foram homogeneizadas e os teores iniciais dos constituintes no produto foram computados para efeito de estimativa dos valores finais de fração mássica. Novamente, todos os ensaios envolvidos na determinação da densidade foram realizados em triplicata.

3.1.4 Condutividade Térmica

A condutividade térmica da farinha de resíduos foi determinada empregando-se um equipamento experimental baseado no método do cilindro teoricamente infinito, imerso em um ambiente com temperatura controlada, considerando a hipótese da condução unidimensional em regime transiente (RIBEIRO, 2007; ZANOELO *et al.*, 2010). O sistema experimental envolveu um anel cilíndrico feito de polipropileno com a dimensão de 0,159 m (L) de comprimento, 0,046 m de diâmetro externo e 0,015 m de diâmetro interno. Dois termopares tipo K previamente calibrados e com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ foram posicionados a 0,02 e 0,075 m de distância de uma das faces do cilindro. Com exceção das extremidades, as quais foram expostas às mesmas condições de temperatura, todo o conjunto foi isolado com poliestireno expandido. Todo o aparato esquematicamente apresentado na Figura 3.2, foi projetado e montado especificamente para os propósitos desta investigação.

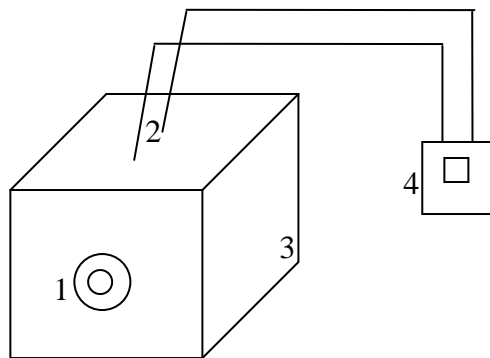


Figura 3.2 – Aparato experimental utilizado para determinar a condutividade térmica do material, onde: cilindro de polipropileno; 2 termopares devidamente calibrados; 3 cubo de poliestireno expandido; 4 leitor de temperatura digital.

Assim como para a validação do calor específico, foram realizados testes com diferentes alimentos (amido e banana) para comparação com valores referenciados pela literatura, e posterior validação.

Amostras do material investigado a uma temperatura inicial uniforme (T_0) foram inseridas no interior do cilindro, de forma compactada, e transferidos para uma estufa (NOVA ÉTICA, modelo 400-2ND), com circulação de ar a 60°C por 7200 segundos. A temperatura foi monitorada a cada 600 segundos.

Nos ensaios com mistura de farinha e água, bem como farinha e gordura, a estufa acima especificada foi substituída por uma câmara refrigerada a fim de evitar a evaporação de água e a fusão da gordura, fenômenos que certamente afetariam a transferência de calor na barra feita com o material investigado. Onze testes com variação de umidade de 2,55 a 60,12% (base úmida) e conteúdo de gordura entre 5,43 e 50% foram realizados em ambiente refrigerado com temperatura aproximadamente de 4 °C por 7200 s. A temperatura foi monitorada a cada 600 s. Os testes foram realizados em triplicatas,

A equação de Fourier para condução de calor unidirecional, (WELTY et al. 1984) sob condições que negligenciam a resistência na superfície foi aplicada para reproduzir experimentalmente os resultados de transferência de calor da farinha de resíduos.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{k_f}{\rho_f C p_f} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.4)$$

Na Equação (3.4) u representa a diferença entre a temperatura do produto em diferentes tempos e posições e a temperatura do ambiente onde o material foi inserido (T_∞) em $^\circ\text{C}$, t é o tempo de aquecimento em s e z denota a posição ao longo do cilindro na direção em que ocorre transferência de calor por condução em m .

A equação diferencial parcial acima representada foi resolvida pelo método de separação de variáveis (WYLIE e BARRET 1985; ZILL e CULLEN 1989), de acordo com procedimento descrito na secção 3.3 deste capítulo, gerando a Equação (3.5).

$$u(z,t) = \frac{2(T_o - T_\infty)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \left[\frac{1 - \cos(n\pi)}{n} \right] \text{sen} \left(\frac{n\pi z}{L} \right) \exp \left[-\frac{k_f t}{\rho_f C p_f} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.5)$$

A condutividade térmica (k_f) foi estimada através do método simplex, (o método de otimização em questão foi implementado na rotina computacional em FORTRAN) (JENSON e JEFFREYS, 1977) por minimização do somatório das diferenças relativas ao quadrado entre os valores experimentais médios e calculados de temperatura em diferentes tempos de aquecimento.

A temperatura média desde o instante inicial em que o cilindro é submetido a (T_∞) até o equilíbrio térmico é determinada pelo teorema da média, o qual é representado pela Equação (3.6).

$$\bar{T}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(z,t) dz \quad (3.6)$$

3.1.5 Difusividade Térmica

A difusividade térmica do produto foi determinada, indiretamente, utilizando-se os valores experimentais da densidade aparente, do calor específico e da condutividade térmica, de acordo com a Equação (3.7):

$$\alpha = \frac{k_f}{\rho_f C p_f} \quad (3.7)$$

onde α é a difusividade térmica em $m^2 s^{-1}$; k_f denota a condutividade térmica em $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$; ρ_f é a densidade aparente da farinha em $kg m^{-3}$ e $C p_f$ denota o calor específico em $J Kg^{-1} ^\circ C^{-1}$.

3.2 MODELOS MATEMÁTICOS

Todos as equações propostas a seguir foram desenvolvidas assumindo-se que a farinha de resíduos consiste em uma mistura de água, gordura e demais constituintes, denominada massa seca. Nesta porção encontram-se incluídos, proteína, cinzas e outros eventuais componentes não revelados na análise centesimal, como por exemplo, carboidratos que teoricamente poderiam estar presentes nas vísceras das aves em decorrência de uma alimentação a base de grãos.

3.2.1 Calor Específico

O produto do calor específico pela massa dos diferentes constituintes é uma propriedade aditiva. A aplicação deste conceito para a estimativa do calor específico da farinha de resíduos torna-se evidente a partir da observação da Equação (3.8), onde M denota a massa, Cp é o calor específico e os subscritos f , s , g e a indicam farinha, massa seca, gordura e água, respectivamente.

$$M_f C p_f = M_s C p_s + M_g C p_g + M_a C p_a \quad (3.8)$$

A divisão de todos os termos da expressão acima pela massa total de farinha envolvida nos ensaios (M_f) gera a Equação (3.9) e por consequência a (3.10), visto que a razão que multiplica os diferentes calores específicos nesta correlação é notoriamente a fração mássica de cada constituinte (x).

$$Cp_f = \frac{M_s}{M_f} Cp_s + \frac{M_g}{M_f} Cp_g + \frac{M_a}{M_f} Cp_a \quad (3.9)$$

$$Cp_f = x_s Cp_s + x_g Cp_g + x_a Cp_a \quad (3.10)$$

Baseado na correlação entre a umidade em base úmida e seca, indicada pela Equação (3.11), pode-se obter a relação do calor específico do produto com a razão entre a massa de cada componente da farinha e a massa total reduzida da massa deste constituinte (y).

$$x_a = \frac{y_a}{y_a + 1} \quad (3.11)$$

$$Cp_f = Cp_s \left(\frac{y_s}{y_s + 1} \right) + Cp_g \left(\frac{y_g}{y_g + 1} \right) + Cp_a \left(\frac{y_a}{y_a + 1} \right) \quad (3.12)$$

3.2.2 Densidade Aparente

A densidade aparente da farinha de resíduos é dada pela razão entre a massa e o volume da farinha. Dado que o produto é constituído por gordura, água e a soma de demais compostos, cuja massa e volume são indicados por M e V , torna-se clara a aplicação da definição de densidade acima exposta no desenvolvimento da Equação (3.13). A Equação (3.14) surge imediatamente como decorrência da necessidade de obtenção de uma expressão de densidade da farinha em função da densidade dos componentes individuais que a compõe.

$$\rho_f = \frac{M_s + M_g + M_a}{V_s + V_g + V_a} \quad (3.13)$$

$$\rho_f = \frac{M_s + M_g + M_a}{\frac{M_s}{\rho_s} + \frac{M_g}{\rho_g} + \frac{M_a}{\rho_a}} \quad (3.14)$$

Calculando-se o mínimo múltiplo comum no denominador da Equação (3.14), seguido de uma operação de divisão de frações obtém-se a Equação (3.15), que dividida pela massa total do produto resulta na Equação (3.16), (3.17) e (3.18).

$$\rho_f = \frac{\rho_s \rho_g \rho_a (M_s + M_g + M_a)}{\rho_g \rho_a (M_s) + \rho_s \rho_a (M_g) + \rho_s \rho_g (M_a)} \quad (3.15)$$

$$\rho_f = \frac{\rho_s \rho_g \rho_a}{\rho_g \rho_a x_s + \rho_s \rho_a x_g + \rho_s \rho_g x_a} \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{\rho_f} = \frac{\rho_g \rho_a x_s + \rho_s \rho_a x_g + \rho_s \rho_g x_a}{\rho_s \rho_g \rho_a} = \frac{x_s}{\rho_s} + \frac{x_g}{\rho_g} + \frac{x_a}{\rho_a} \quad (3.17)$$

$$\rho_f = \left(\frac{x_s}{\rho_s} + \frac{x_g}{\rho_g} + \frac{x_a}{\rho_a} \right)^{-1} \quad (3.18)$$

A Equação (3.19) é prontamente obtida a partir da expressão acima, baseado no conceito estabelecido na Equação (3.11).

$$\rho_f = \left[\frac{1}{\rho_s} \left(\frac{y_s}{y_s + 1} \right) + \frac{1}{\rho_g} \left(\frac{y_g}{y_g + 1} \right) + \frac{1}{\rho_a} \left(\frac{y_a}{y_a + 1} \right) \right]^{-1} \quad (3.19)$$

3.2.3 Condutividade Térmica

A hipótese de isotropia do material, o que implica em uma distribuição homogênea dos diferentes constituintes no produto é considerada na Equação (3.20). A mesma premissa permite a obtenção das Equações (3.21) a (3.23).

$$\kappa_f A_t \frac{dT}{dz} = \kappa_s A_s \frac{dT}{dz} + \kappa_g A_g \frac{dT}{dz} + \kappa_a A_a \frac{dT}{dz} \quad (3.20)$$

$$\frac{A_a \Delta z}{A_f \Delta z} = \frac{V_a}{V_f} \quad (3.21)$$

$$\frac{A_g \Delta z}{A_f \Delta z} = \frac{V_g}{V_f} \quad (3.22)$$

$$\frac{A_s \Delta z}{A_f \Delta z} = \frac{V_s}{V_f} \quad (3.23)$$

A obtenção de expressões que correlacionem a razão entre o volume de cada constituinte e o de produto à densidade (Equações 3.24, 3.25 e 3.26) e a aplicação destas, juntamente com as Equações (3.21) a (3.23) na Equação (3.20) resulta na Equação (3.26) e (3.27).

$$\frac{V_a}{V_f} = \frac{(M_a / \rho_a)}{(M_f / \rho_f)} = \left(\frac{M_a}{\rho_a} \right) \left(\frac{\rho_f}{M_f} \right) = \frac{\rho_f}{\rho_a} x_a \quad (3.24)$$

$$\frac{V_g}{V_f} = \frac{\rho_f}{\rho_g} x_g \quad (3.24)$$

$$\frac{V_s}{V_f} = \frac{\rho_f}{\rho_s} x_s \quad (3.25)$$

$$\kappa_f = \frac{\kappa_s \rho_f}{\rho_s} x_s + \frac{\kappa_g \rho_f}{\rho_g} x_g + \frac{\kappa_a \rho_f}{\rho_a} x_a \quad (3.26)$$

$$\kappa_f = \rho_f \left[\frac{\kappa_s}{\rho_s} \left(\frac{y_s}{y_s + 1} \right) + \frac{\kappa_g}{\rho_g} \left(\frac{y_g}{y_g + 1} \right) + \frac{\kappa_a}{\rho_a} \left(\frac{y_a}{y_a + 1} \right) \right] \quad (3.27)$$

3.3 SOLUÇÃO DO MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR UNIDIMENSIONAL EM REGIME TRANSIENTE

A Condutividade térmica da farinha de resíduos a partir de resultados em regime transiente e condução unidimensional, desprezando as perdas na superfície lateral do cilindro foi determinada resolvendo a Equação (3.4), a qual foi obtida por manipulação algébrica da Equação (3.28). Em particular, foi feita uma substituição de variável detalhada na Equação (3.29).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{k_f}{\rho_f C p_f} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial(u+T_\infty)}{\partial t} = \left(\frac{k_f}{\rho_f C p_f} \right) \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial T_\infty}{\partial z} \right) \right] \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{k_f}{\rho_f C p_f} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.4)$$

Como especificado anteriormente, o método de separação de variáveis foi aplicado para solução da mesma. Neste procedimento, assume-se que a solução $u(z,t)$ é dada pelo produto de uma função $P(z)$ por uma $Q(t)$, cujas derivadas em relação a cada variável independente envolvida na Equação (3.4) são apresentadas abaixo.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = PQ' \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = P'' Q \quad (3.31)$$

A substituição das expressões acima na Equação (3.4) e uma rápida manipulação algébrica gera a Equação (3.32). Por razões extensivamente reportadas na literatura ambos os termos desta igualdade são iguais a uma

constante $(-\lambda^2)$, o que permite desmembrar a equação diferencial parcial original em duas equações diferenciais ordinárias (EDO's) (Equação 3.33 e 3.34) que podem ser resolvidas separadamente.

$$\frac{P''}{P} = \frac{Q'}{\alpha Q} \quad (3.32)$$

$$\frac{P''}{P} = -\lambda^2 \quad (3.33)$$

$$\frac{Q'}{\alpha Q} = -\lambda^2 \quad (3.34)$$

A Equação (3.33) é uma EDO de 2ª ordem com coeficientes constantes e sua solução requer simplesmente o cálculo das raízes de uma equação de 2º grau (equação auxiliar). A Equação (3.34) é uma EDO de 1ª ordem separável e, portanto resolvível por imediata integração.

$$P = C_1 \cos \lambda z + C_2 \sin \lambda z \quad (3.35)$$

$$Q = C_3 \exp(-\alpha \lambda^2) \quad (3.36)$$

As seguintes condições de contorno são válidas para a solução da Equação (3.4) e devem ser aplicadas para estimativa das constantes de integração acima (C_1 a C_3 e λ): através da aplicação das seguintes condições de contorno: i) $z=0 \rightarrow u=0$; ii) $z=L \rightarrow u=0$; iii) $t=0 \rightarrow u=T_o-T_\infty$. Observe que somente três condições de contorno são necessárias visto que o produto das Equações (3.35) e (3.36), o qual representa a solução $u(z,t)$, elimina uma das constantes.

A aplicação da primeira condição de contorno requer que P seja igual a zero, pois somente esta função depende de z , logo $C_1=0$. Pela mesma razão a segunda condição de contorno deve ser aplicada em P , o que determina $\lambda=n\pi/L$. Substituindo-se as constantes C_1 e λ em $u(z,t)$ obtém-se a Equação (3.37) ou (3.38)

$$u(z,t) = C_2 \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L}z\right) C_3 \exp\left[-\alpha t \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2\right] \quad (3.37)$$

$$u_n = A_n \exp\left[-\alpha t \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2\right] \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{L}z\right) \quad (3.38)$$

A obtenção do valor da última constante por aplicação da terceira condição de contorno requer a aplicação do princípio da superposição a Equação (3.38) e o conhecimento de séries de Fourier do seno (WYLIE e BARRET 1985; ZILL e CULLEN 1989), gerando uma expressão para A_n que após integração em z resulta na solução final da equação de calor investigada, a qual foi anteriormente apresentada (Equação 3.5).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos segundo a metodologia detalhada no capítulo anterior. Em particular, serão reportados os dados de caracterização centesimal, de calor específico, densidade aparente e condutividade térmica do produto. Para cada uma das citadas propriedades os resultados experimentais e calculados com os modelos matemáticos propostos serão apresentados simultaneamente.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA

As amostras recebidas dos abatedouros de aves A e B foram caracterizadas para definição dos percentuais de proteína, lipídeos, cinzas e umidade. Este aspecto foi investigado devido a notória influência dos componentes do produto sobre as propriedades investigadas.

A Figura 4.1 demonstra os resultados das análises para cada uma das sete amostras recebidas do frigorífico A. Exceto pelos teores de lipídeos, diferenças sutis foram observadas quando comparados os percentuais de cada constituinte de produtos oriundos de diferentes lotes. Os reduzidos desvios padrões representados pelas barras de erros na Figura 4.1 corroboram a validade dos procedimentos experimentais adotados. Neste sentido, excluída a possibilidade de erros experimentais que justifiquem as diferenças evidenciadas nos teores de lipídeos, torna-se concreta a hipótese de falhas no estágio de remoção de gordura por prensagem. Esta afirmação não necessariamente indica que as condições de operação utilizadas não sejam padronizadas, visto que estas diferenças podem também ser atribuídas a variação das características dos resíduos em diferentes lotes, mas sim um descontrole do teor de gordura na farinha produzida.

Valores médios dos percentuais dos componentes foram calculados a fim de analisar a qualidade do produto em confronto com o que determina a legislação. Neste contexto, uma umidade de aproximadamente 4% (base úmida) foi encontrada nas sete amostras, sendo que o máximo permitido é de 8% (BRASIL, 2005). Esta umidade reduzida é consequência das operações de prensagem e secagem, aplicadas com o intuito de reduzir a degradação do material durante estágios posteriores de armazenamento. As análises também revelaram que as amostras analisadas apresentaram uma quantidade de lipídeos média de cerca de 14%, cujo

valor aproxima-se do percentual de 11% reportado na literatura por Brown *et al.*, (2002). Um teor de cinzas de 10% foi encontrado nas amostras do produto. Este valor pode variar dependendo da quantidade de ossos depositados nos digestores durante o processamento. No que se refere à quantidade de proteínas, quantidades próximas a 58% foram encontradas. De acordo com a Agência de Vigilância Sanitária norma nº 343, de 04 de novembro de 1996, a farinha de resíduos deve apresentar um mínimo de 40% de proteína, pois o principal emprego deste produto é na suplementação de ração animal.

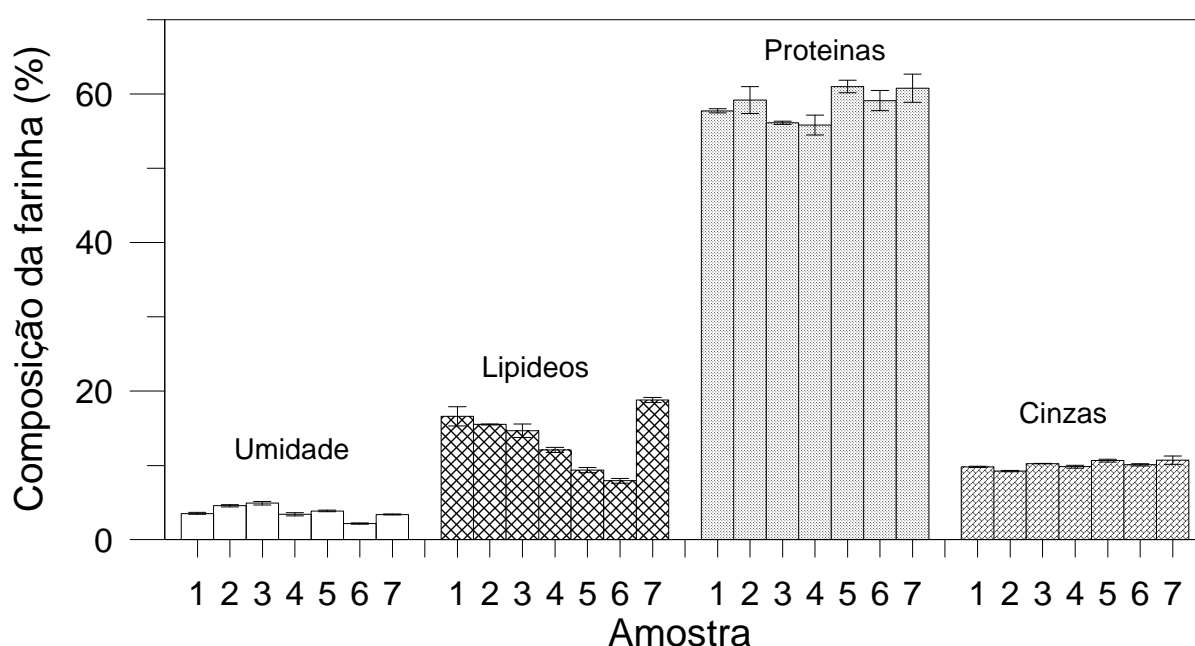


Figura 4.1 – Caracterização de amostras da farinha do Frigorífico A de diferentes dias de uma semana de produção.

Como anteriormente mencionado, a amostra do frigorífico *B* foi obtida de um único lote, caracterizada e comparada com a média das amostras do frigorífico *A*. Pode-se perceber que a umidade e teor de cinzas das amostras das duas indústrias são praticamente iguais. Todavia, uma diferença significativa é evidenciada entre a quantidade de gordura média da indústria *A* e do mesmo componente no produto da indústria *B*. Fato semelhante é observado no montante de proteína, embora em termos relativos esta diferença seja menos acentuada.

Em termos nutricionais pode-se inferir que o produto da indústria *A* apresenta qualidade superior ao da indústria *B*, embora o teor de proteína deste último esteja somente ligeiramente abaixo do estipulado pela legislação (37%<40%). Ainda sobre

este tópico, convém observar que o percentual não removido de gordura é que é responsável pela redução evidenciada de proteína no produto da indústria *B*. A redução de lipídeos a 14% (nível aproximado do produto da indústria *A*) provocaria um aumento da proporção de proteína de aproximadamente 12%, elevando a fração deste constituinte a aproximadamente 49% no material do frigorífico *B*.

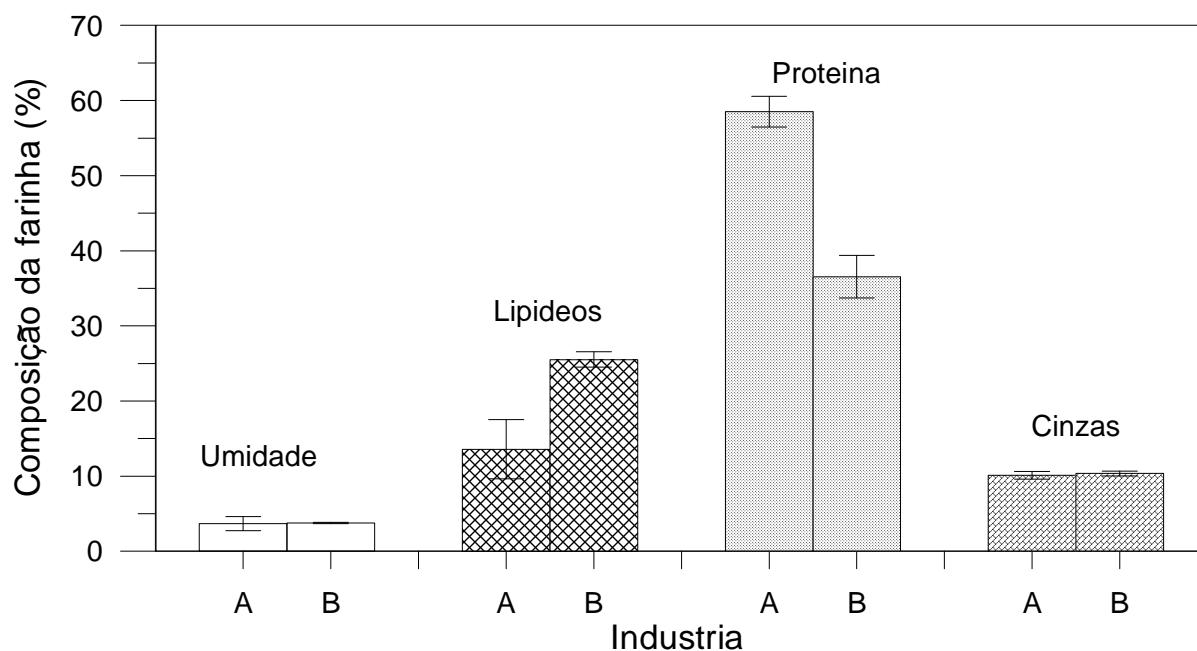


Figura 4.2 – Comparação entre composição centesimal das farinhas da indústria frigorífica A e B.

4.2 CALOR ESPECÍFICO

Um conjunto de 22 resultados de calor específico, reportados na literatura (MOHSENIN, 1980) para diferentes produtos, é apresentado na Figura 4.3. Estes dados abrangem o intervalo de variação desta propriedade para quase a totalidade de alimentos. Embora, proteínas, cinzas, carboidratos e lipídeos tenham influência significativa no calor específico, é a concentração de água a maior responsável pela variação observada nos valores apresentados na Figura 4.3.

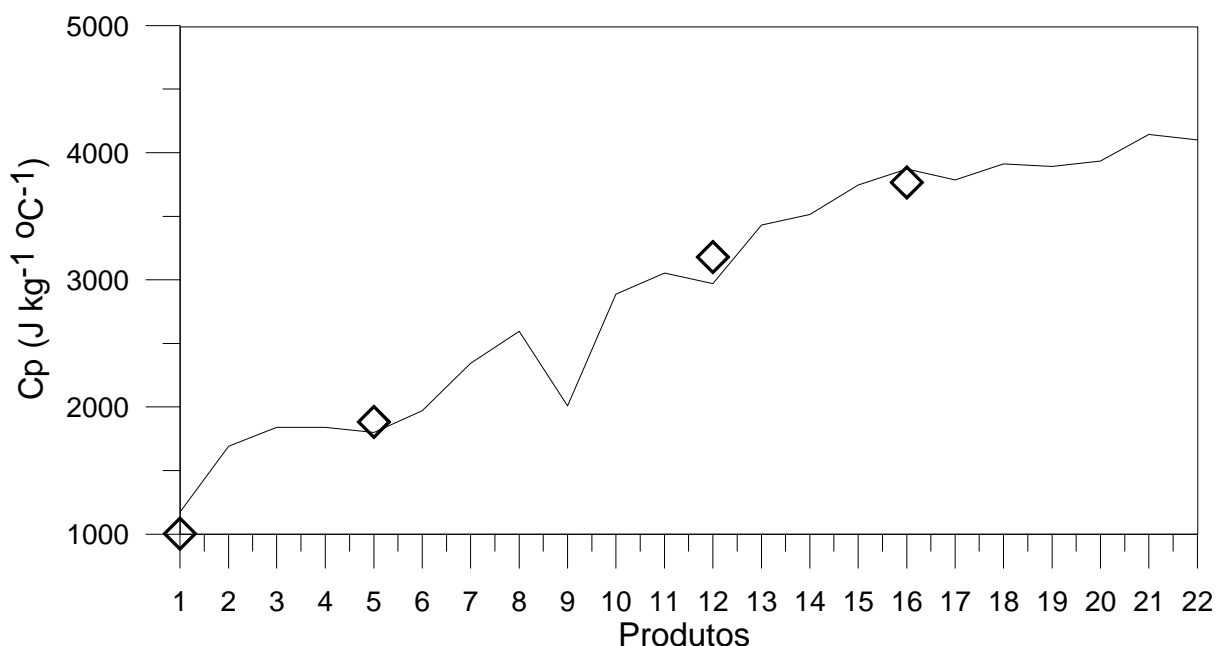


Figura 4.3 – Comparação entre valores de calor específico reportados na literatura (linha sólida) e obtidos nesta investigação (símbolos) para produtos com diferentes umidades. 1=amido (NOEL E RING, 1992), 2=milho, 3=lentilha, 4=ervilha desidratada, 5=arroz, 7=cogumelo desidratado, 8=carne de porco gorda, 9=bacon, 10=carne bovina gorda, 11=carne de porco magra, 13=carne bovina magra, 14=batata, 15=cebola, 16=maçã, 17=espinafre, 18=morango, 19=alcachofra, 20=cogumelo fresco, 21=cenoura, 22=pepino (MOHSENIN, 1980); 6=soja (ASAE standards, 2000); 12=banana (RIBEIRO *et al.*, 2002),. Linha continua=faixas de umidade em base úmida.

A fim de validar a técnica utilizada para determinação do calor específico da farinha de resíduos, ensaios foram realizados com 4 dentre os 22 produtos com valores conhecidos da propriedade investigada. Em particular, foram escolhidos produtos com diferentes valores de umidade e que abrangessem o maior intervalo de variação deste fator. A comparação demonstrada na Figura 4.3 entre os valores de Cp experimentalmente obtidos nesta investigação e reportados na literatura para amido, arroz, banana e maçã corroboram a validade do procedimento utilizado para determinação do calor específico.

Um confronto adicional entre valores de calor específico experimentais e referenciados na literatura por outros autores (HELDMAN, 1975; STANLEY E CHARM, 1971; RIBEIRO *et al.*, 2002; HELDMAN e LUND, 2007) envolvendo

produtos dentro da mesma faixa de umidade e gerando conclusões similares as apresentada no parágrafo anterior é apresentada na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Valores experimentais e reportados na literatura de calor específico para 4 dentre os 22 diferentes produtos reportados na Figura 4.3.

Produto	Experimental		Literatura		Referências
	M (b.s.)	Cp ($\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$)	M (b.s.)	Cp ($\text{J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$)	
Amido	0,09	1023,9	0,13	1338,8	HELDMAN (1975)
Arroz	0,116	1745,4	0,135	1757,2	STANLEY e CHARM (1971)
Banana	2,04	3040,5	2,97	3347,2	MOHSENIN (1980)
Maçã	4,07	3744,3	4,81	3872,5	HELDMAN e LUND(2007)

Após validação da técnica de determinação do calor específico foram realizados ensaios com a farinha *in natura* da indústria A, cujos resultados são apresentados na Figura 4.4.

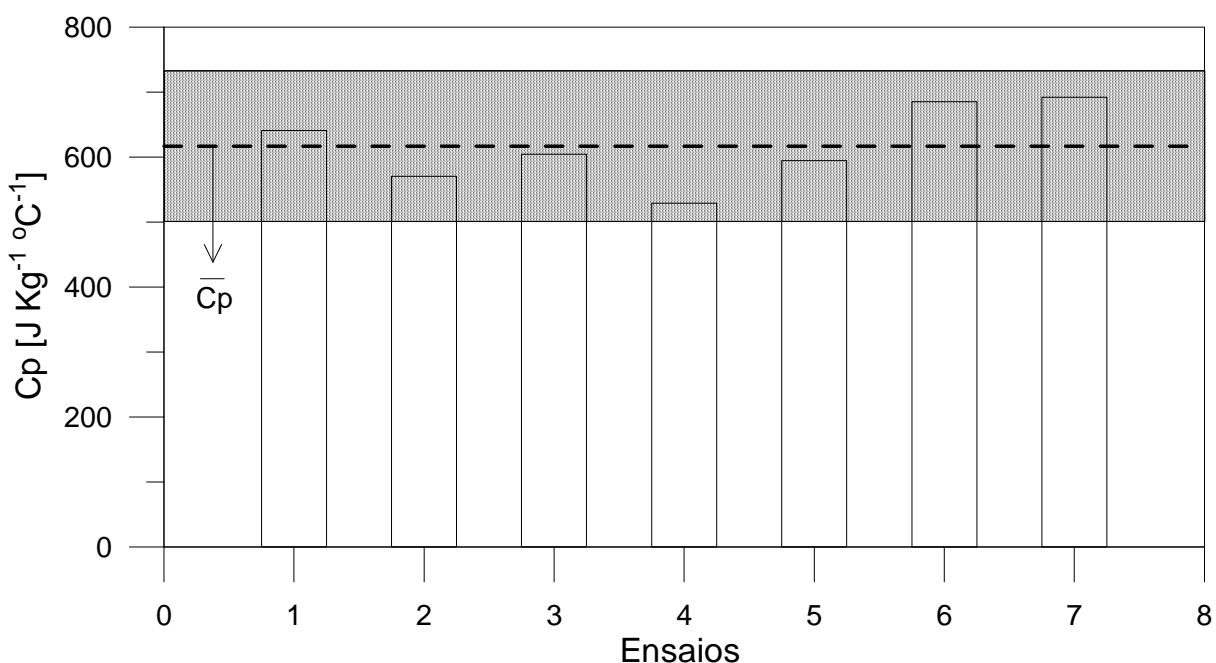


Figura 4.4 – Calor específico da farinha de resíduos *in natura* com umidade inicial de $3,67 \pm 0,96\%$ (base úmida), lipídeos igual a $13,56 \pm 3,94\%$, proteína entorno de $58,52 \pm 2,06\%$ e $10,08 \pm 0,51\%$ de cinzas. Região sombreada: intervalo de confiança das medidas com 90% de probabilidade.

Na Figura acima as barras verticais representam os valores da propriedade, a linha tracejada denota o valor médio encontrado e a região sombreada o intervalo de confiança dos resultados com uma probabilidade de 90%.

Os resultados dos ensaios utilizando misturas de farinha e água, bem como de farinha e gordura, os quais envolveram 42 experimentos e foram realizados a fim de determinar o efeito da fração mássica destes constituintes no calor específico do produto são apresentados respectivamente nas Figuras 4.5 e 4.6. Na Figura 4.5 a propriedade é reportada em função de uma variável diretamente dependente da fração mássica de água (umidade em base seca), já definida na Equação 3.11. O resultado do efeito da gordura sobre todas as propriedades investigadas envolveu diagramas similares sendo Y_g definida de forma análoga a Y_a .

O conjunto de dados experimentais reportados nas Figuras 4.5 e 4.6 foram utilizados para ajuste simultâneo dos parâmetros da Equação (3.12), a qual é novamente reportada a seguir com os valores encontrados das constantes. Em especial, a função objetivo foi definida com o propósito de minimizar o somatório dos quadrados dos desvios absolutos entre resultados experimentais e calculados.

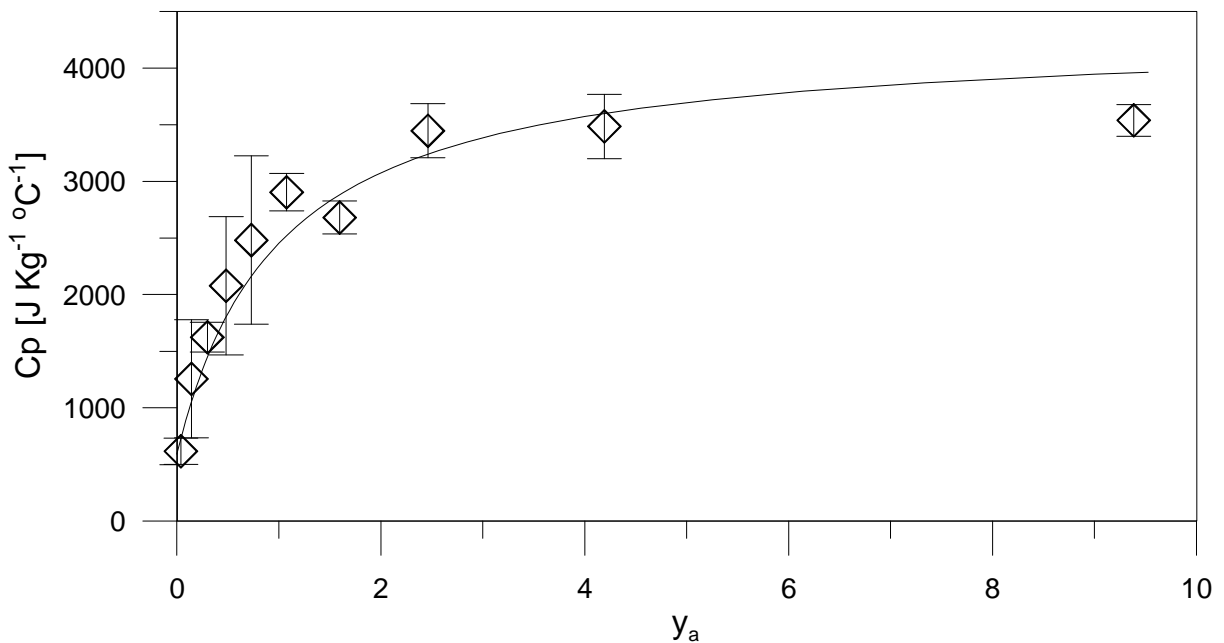


Figura 4.5 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de calor específico em diferentes frações mássicas de água.

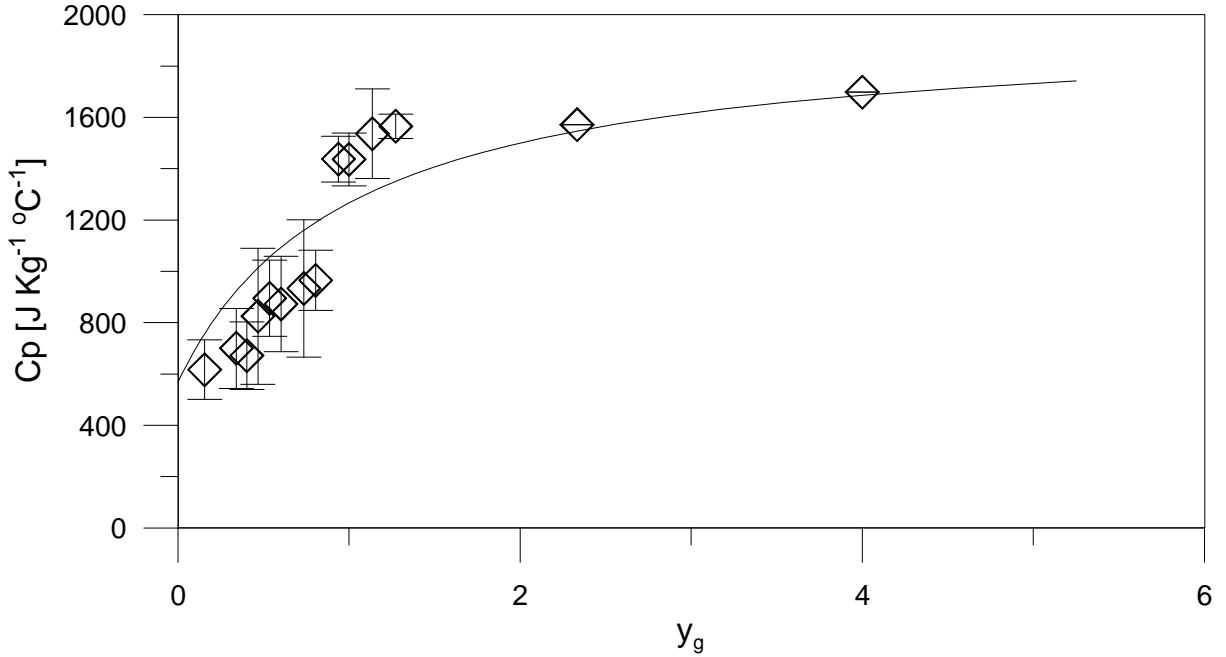


FIGURA 4.6 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de calor específico em diferentes frações mássicas de gordura.

$$Cp_f = 366 \frac{y_s}{y_s + 1} + 1966 \frac{y_g}{y_g + 1} + 4318 \frac{y_a}{y_a + 1} \quad (3.12)$$

Na expressão acima, 366, 1966 e 4318 $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ são os valores do calor específico da farinha seca, da gordura e da água, respectivamente. Exceto para o primeiro, a consistência destes parâmetros pode ser verificada comparando os mesmos com valores análogos reportados na literatura (VALENTAS *et al.*, 1997). A 25°C a diferença relativa entre o calor específico da água e o encontrado é inferior a 4%, enquanto que para a gordura na mesma temperatura esta diferença é de apenas 3%.

Convém lembrar que a relação entre a variável y presente na Equação (3.12) e a fração mássica dos componentes encontra-se especificada pela Equação (3.11) ou (4.2). Nos resultados experimentais envolvidos no ajuste dos parâmetros acima, a fração mássica de massa seca foi determinada através da Equação (4.1).

$$x_s = 1 - x_a - x_g \quad (4.1)$$

$$y_s = \frac{x_s}{1 - x_s} \quad (4.2)$$

Uma comparação entre os resultados de calor específico experimentais e estimados com a Equação (3.12) também é reportada nas Figuras 4.5 e 4.6. Observa-se que o referido modelo descreve corretamente o efeito da umidade e teor de lipídeos sobre a propriedade investigada. Em especial, aproximadamente 97% ($R^2=0,94$) das variações nas respostas devido aos fatores considerados são reproduzidas pelo modelo.

A Figura 4.7 evidencia a influência da umidade em farinhas com diferentes quantidades iniciais de gordura. Observa-se que independente da composição centesimal do produto, quando a fração mássica de água do mesmo tende a unidade ($y_a \rightarrow \infty$) o calor específico tende ao da água pura. No limite inferior de umidade, nota-se que quando o produto é rico em gordura o valor de C_{p_f} se aproxima do calor específico da gordura pura, enquanto que quando o produto apresenta quase que exclusivamente matéria seca, a propriedade tende ao valor do primeiro parâmetro a direita da igualdade da Equação (3.12).

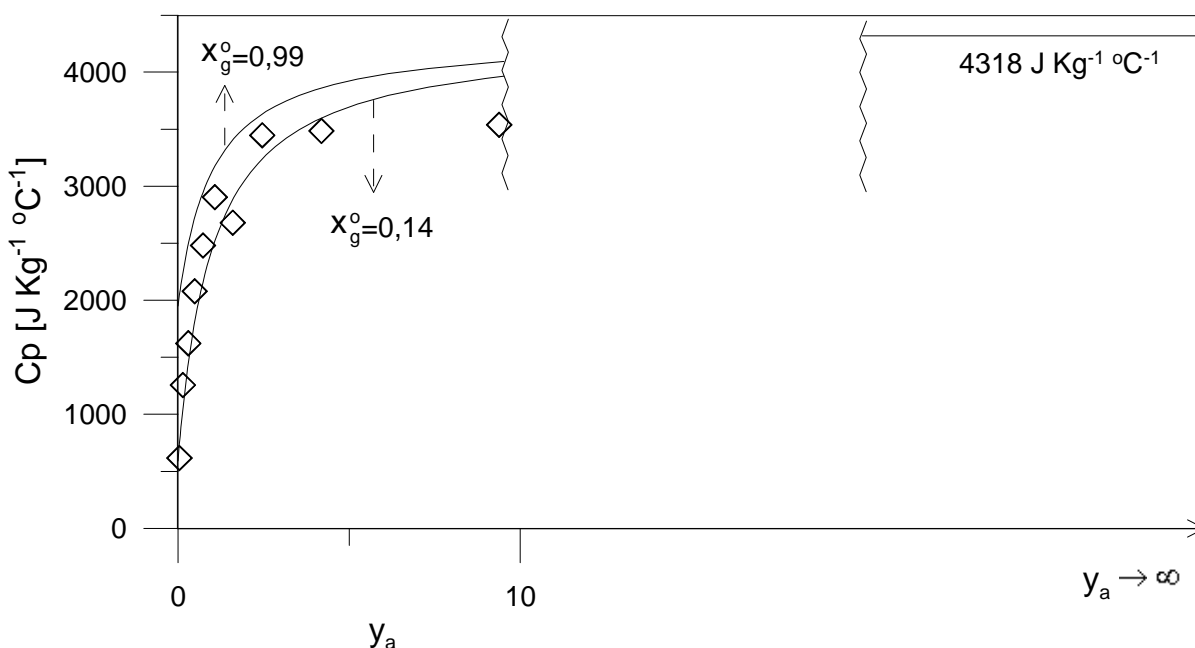


Figura 4.7 – Efeito da fração mássica de água sobre o calor específico da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de gordura.

Um diagrama análogo ao apresentado na Figura 4.7 é reportado na 4.8, porém para analisar o efeito da gordura em farinhas com umidades iniciais diferentes. Uma rápida análise da Figura 4.8 permite estabelecer que: i) quando a fração mássica de lipídeos tende a unidade (isto é, $y_g \rightarrow \infty$) o calor específico tende

ao da gordura; ii) quando o teor de gordura é zero, porém o produto contém quase que unicamente água, então Cp_f tende ao da água pura; iii) e quando o teor de gordura é zero, porém o produto está seco, o valor do calor específico é igual ao reportado na Equação (3.12) para a matéria seca.

Convém esclarecer que os resultados experimentais apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8 são idênticos aos reportados nas Figuras 4.5 e 4.6.

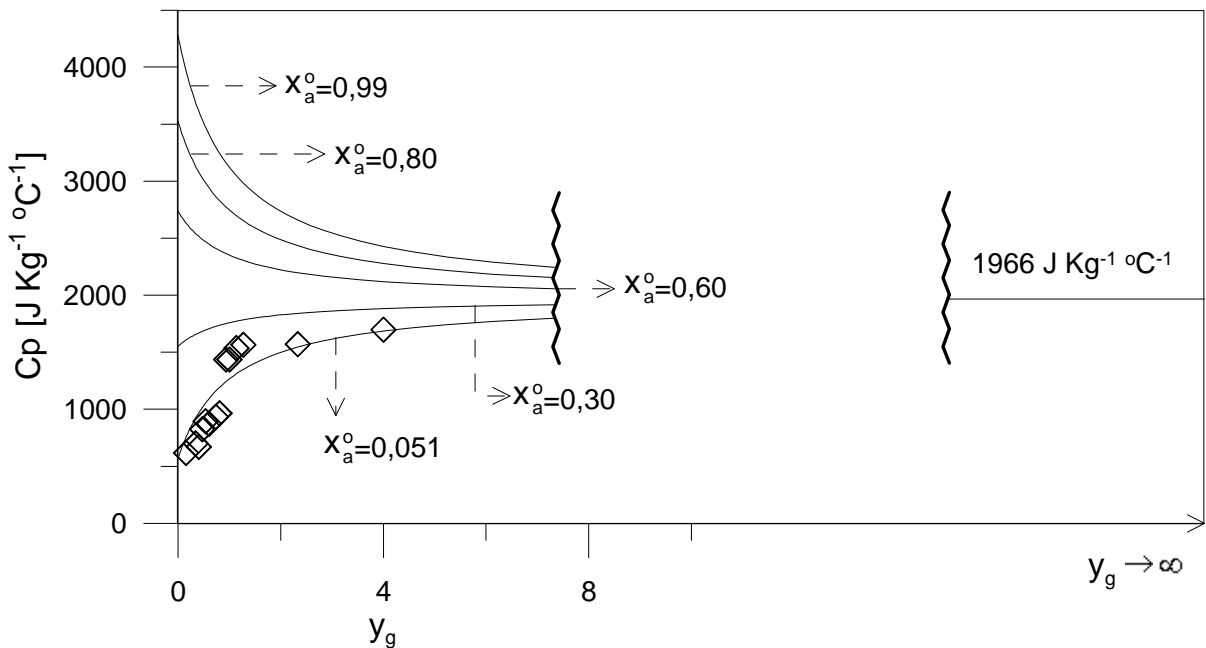


Figura 4.8 – Efeito da fração mássica de gordura sobre o calor específico da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água.

4.3 DENSIDADE APARENTE

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os resultados experimentais de densidades da farinha de vísceras com diferentes teores de água e gordura, respectivamente. Os 18 valores reportados (um dos valores encontra-se repetido), envolvendo 54 experimentos com o picnômetro, foram utilizados para investigar o efeito destas variáveis sobre a densidade aparente. Além disso, estes dados foram utilizados para obtenção dos parâmetros da Equação (3.19), bem como para validação da mesma. Novamente o ajuste das constantes envolveu o método simplex de minimização do somatório dos resíduos absolutos ao quadrado.

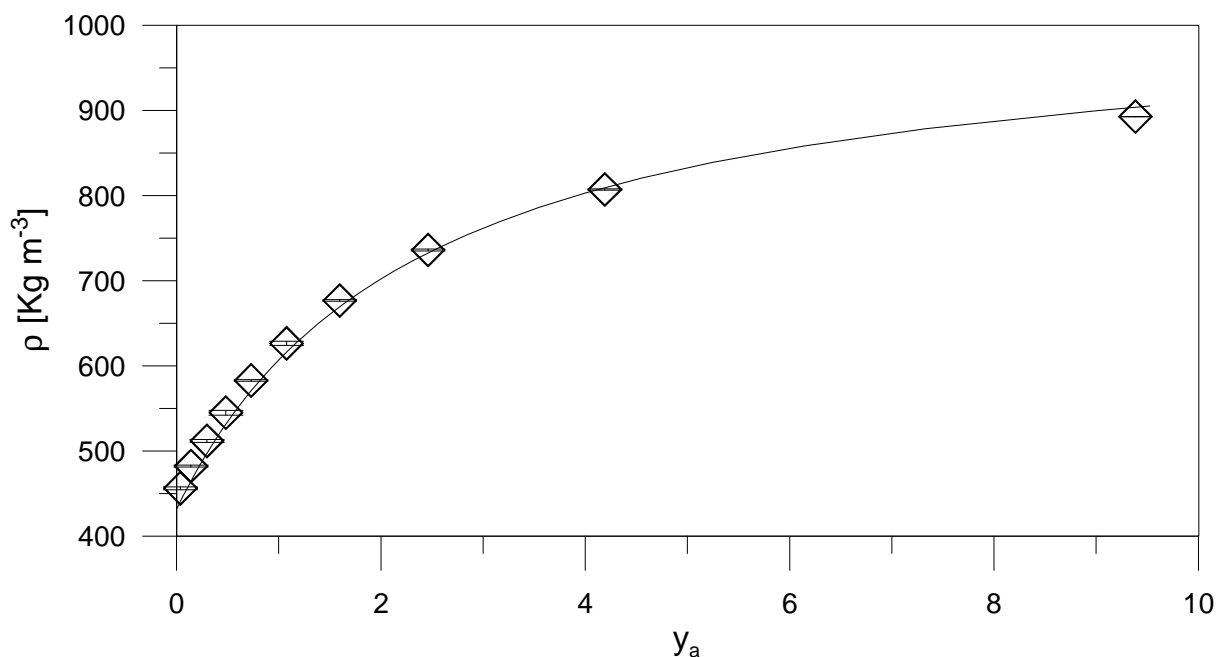


Figura 4.9 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de densidade em diferentes frações mássicas de água.

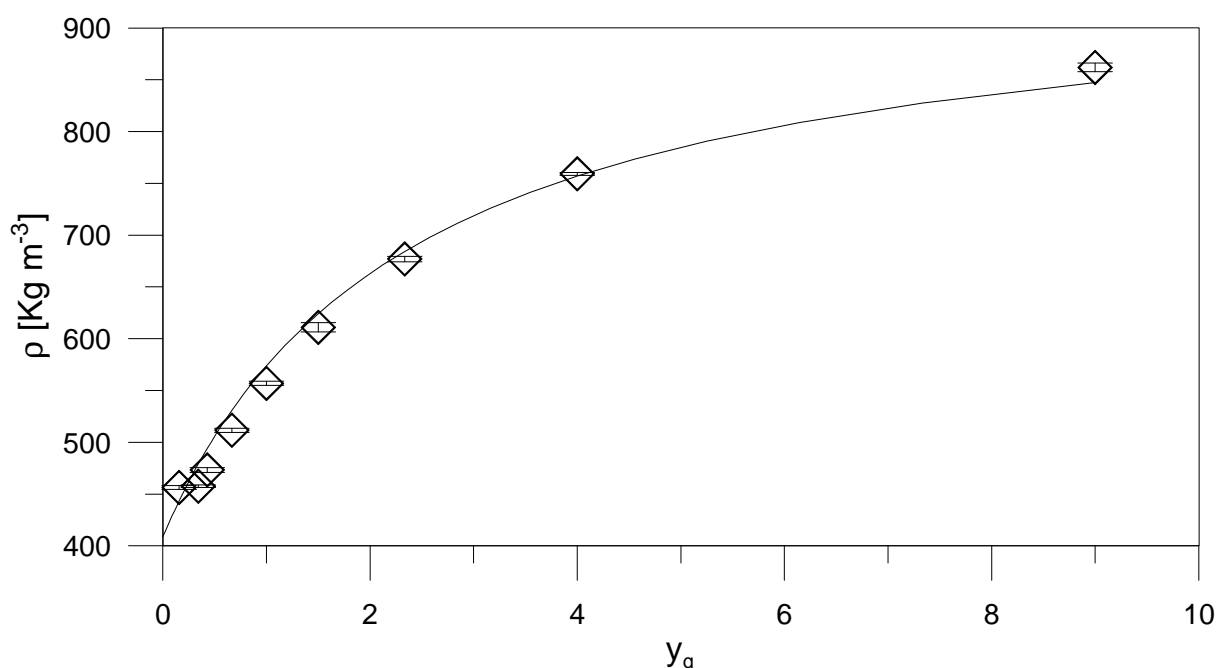


Figura 4.10 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de densidade em diferentes frações mássicas de gordura.

Em certa oposição ao comportamento evidenciado em figuras equivalentes envolvendo dados de calor específico (Figuras 4.5 e 4.6), observa-se neste caso um andamento bem comportado decorrente da adição de água e gordura a farinha. Este fato é devido a menor incerteza envolvida nas medidas primárias (temperatura,

massa) requeridas no cálculo destas propriedades. De fato é evidente o menor desvio padrão das densidades aparentes quando comparadas com calor específico.

Os parâmetros encontrados com os dados evidenciados nas Figuras 4.9 e 4.10 são apresentados na expressão abaixo, a qual quando comparada com o modelo proposto no capítulo anterior, imediatamente revela o significado de cada constante.

$$\rho_f = \left[\frac{1}{396} \frac{y_s}{(y_s + 1)} + \frac{1}{962} \frac{y_g}{(y_g + 1)} + \frac{1}{1023} \frac{y_a}{(y_a + 1)} \right]^{-1} \quad (3.19)$$

À temperatura ambiente (25°C), a diferença entre a densidade da gordura revelada na expressão acima e da literatura (VALENTAS *et al.*, 1997) é de apenas 5%. Em função do conhecido valor da densidade da água, nenhum comentário adicional é requerido para certificar a validade do último parâmetro na relação anterior.

Os resultados reportados nas Figuras 4.9 e 4.10 também revelam que variações de densidade devido a alterações nos teores de água e gordura são totalmente reproduzidas pelo modelo sugerido ($R^2=0,99$). A consistência da Equação (3.19) também é verificada observando-se as simulações reportadas nas Figuras 4.11 e 4.12, as quais demonstram o efeito da umidade sobre a densidade da farinha com diferentes teores iniciais de gordura, e a influência da fração mássica de gordura sobre a densidade da farinha com diferentes umidades iniciais, respectivamente.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 observa-se que nos limites superiores de umidade e gordura a densidade tende a da água e gordura pura, respectivamente. Na extremidade esquerda da Figura 4.11, quando a umidade tende a zero, a densidade aparente se aproxima da densidade da gordura se pouca matéria seca estiver presente na farinha, e tende a da matéria seca se o material for livre de gordura. Conclusões análogas são obtidas por análise da Figura 4.12.

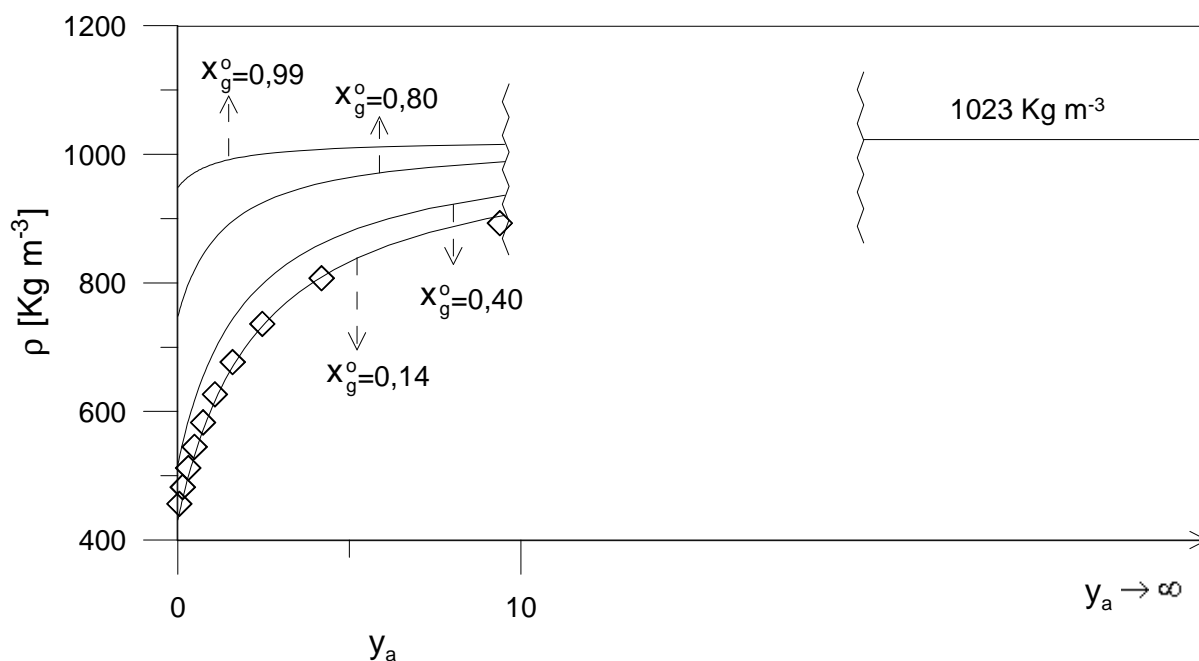


Figura 4.11 – Efeito da fração mássica de água sobre a densidade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de gordura.

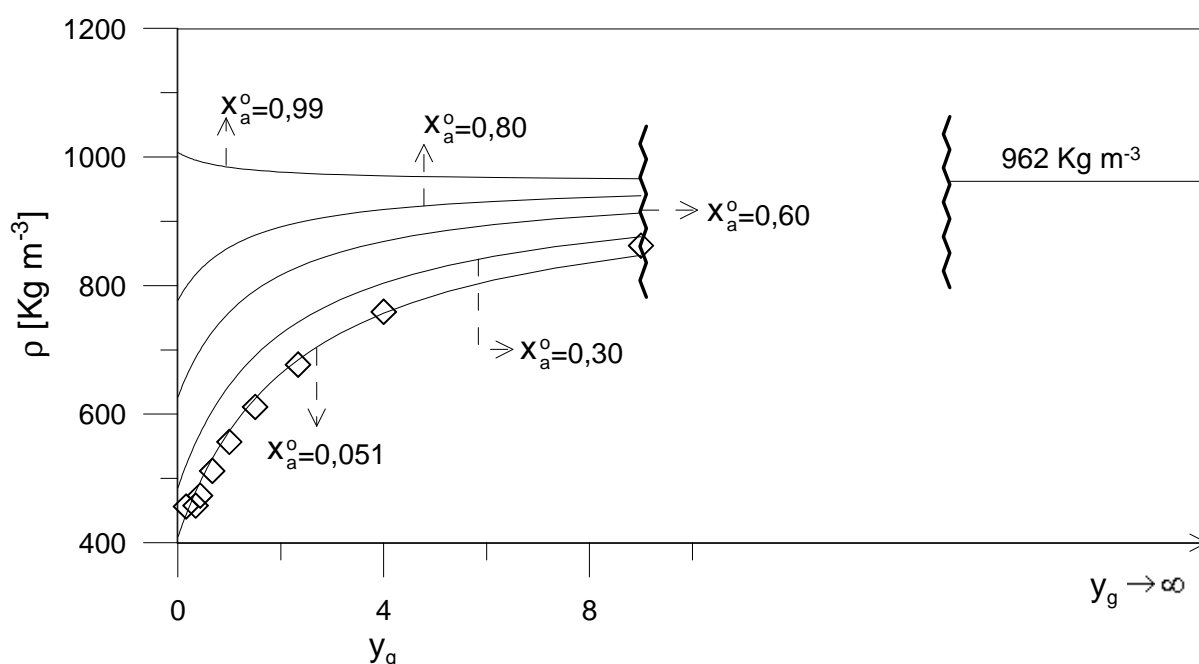


Figura 4.12 – Efeito da fração mássica de gordura sobre a densidade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água.

4.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A mesma estratégia utilizada para validação do procedimento de determinação do calor específico foi adotada para a condutividade térmica, ou seja,

resultados desta propriedade reportados na literatura (MOHSENIN, 1980) para produtos alimentícios foram comparados com valores experimentais encontrados nesta investigação. Em especial, dentre os 15 produtos com umidades que variam de aproximadamente zero a 100% (base úmida) com condutividades conhecidas, apenas amido e banana foram escolhidos para os ensaios experimentais. Entretanto, em ambos os casos, um bom acordo entre valores experimentais e reportados na literatura foi observado.

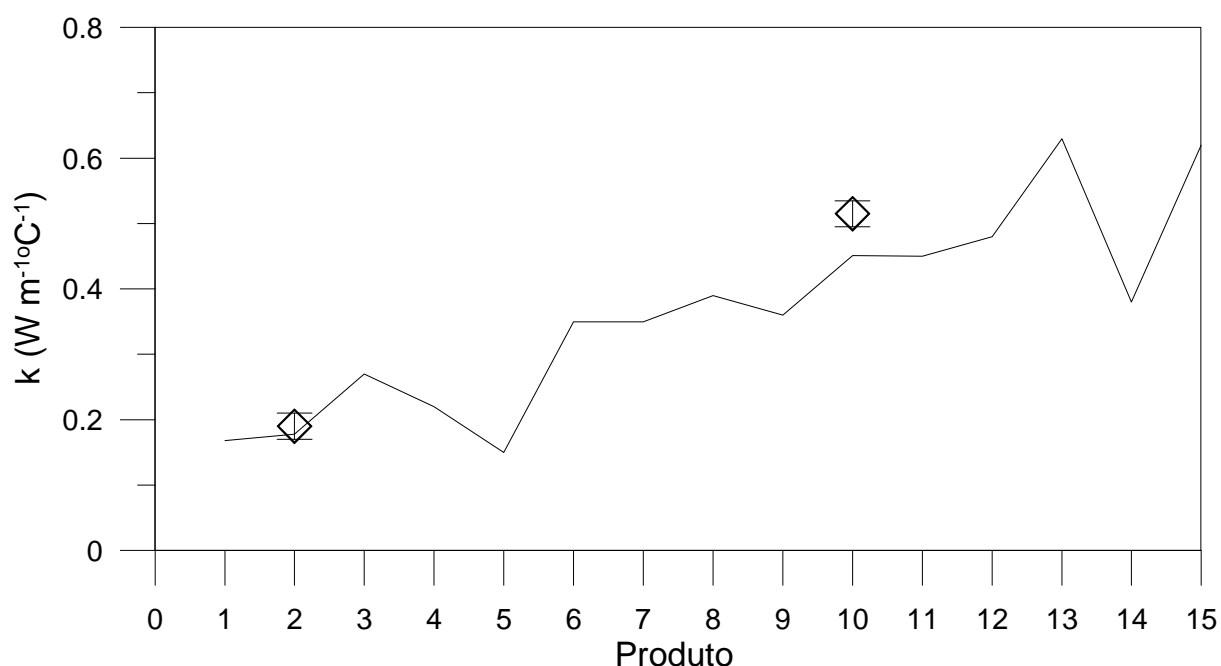


Figura 4.13 – Comparação entre valores de condutividade térmica reportados na literatura (linha sólida) e obtidos nesta investigação (símbolos) para produtos com diferentes umidades. 1=amido (ROTH e TSAO, 1970; SARAVACOS, 2001), 2=carne de porco gorda, 9=carne bovina magra (MOHSENIN, 1980); 3=milho, 4=lentilha, 5=arroz, 6=soja, 7=queijo cheddar, 8=hamburger, 10=batata, 11=banana, 12=cenoura, 13=morango, 14=espinafre, 15=pepino (SARAVACOS, 2001).

Assim como o calor específico, a condutividade térmica de alimentos é conhecida por aumentar com o aumento da umidade e de gordura (SHMALKO *et al.*, 1996; HAMDAMI, *et al.*, 2003). As Figuras 4.14 e 4.15, obtidas a partir de 24 experimentos com diferentes quantidades destes componentes da farinha, confirmam este comportamento.

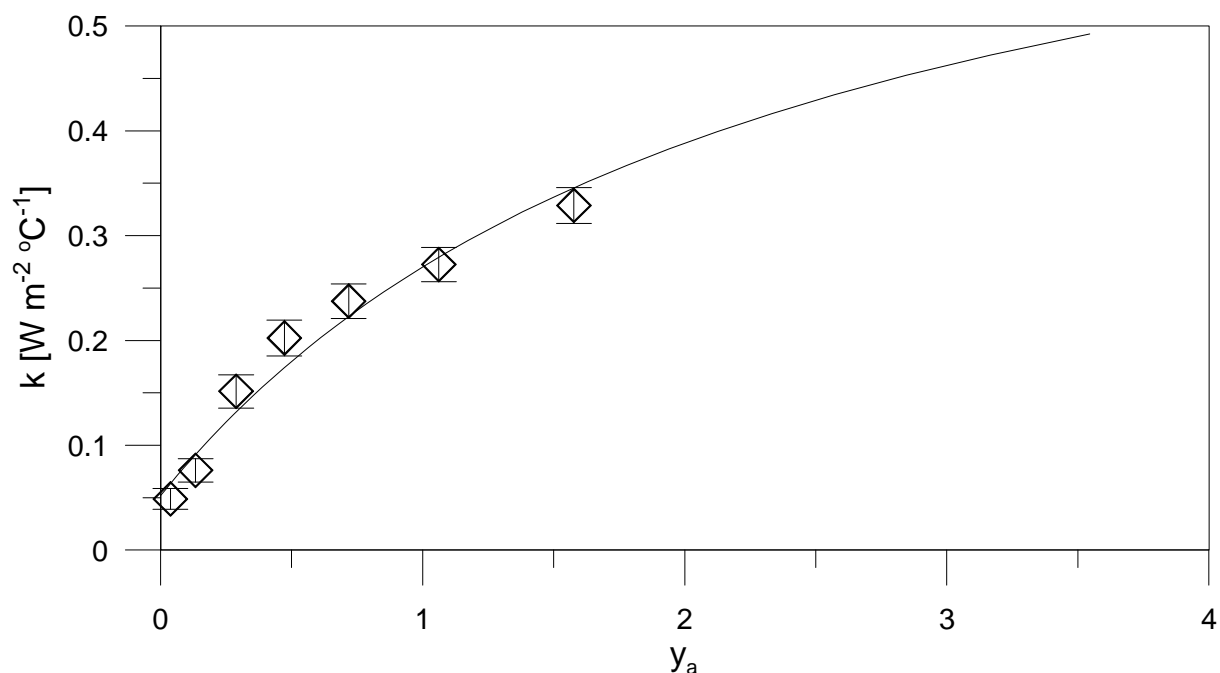


Figura 4.14 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de conduvidade em diferentes frações mássicas de água.

O conjunto de 11 resultados experimentais de conduvidade (um encontra-se repetido em ambas as figuras) reportados nesta investigação foi empregado para ajuste dos parâmetros da Equação (3.27). O mesmo método de otimização e função objetivo utilizados para estimativa dos calores específicos e densidades aparentes dos diversos constituintes da farinha foram envolvidos na obtenção das constantes da Equação (3.27). Aproximadamente 98% das variações dos fatores são estimadas pelo modelo proposto para cálculo da conduvidade térmica da farinha. As diferenças residuais entre valores experimentais e calculados, observadas nas Figuras 4.14 e 4.15, confirmam esta evidência.

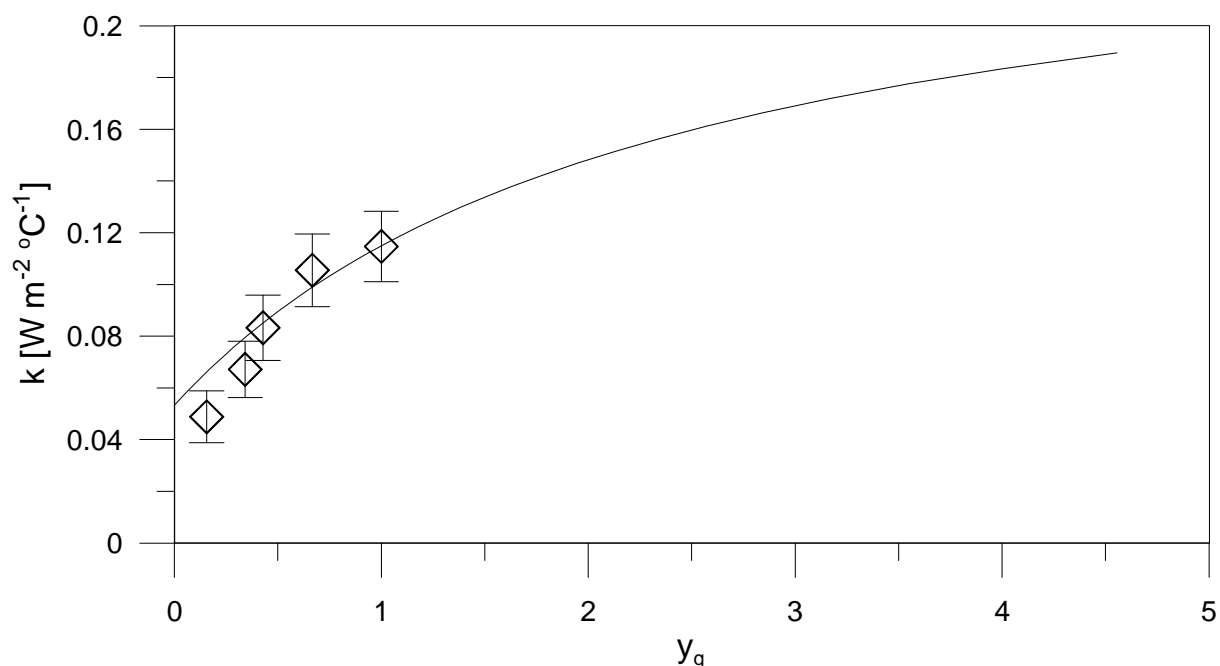


Figura 4.15 – Comparação entre resultados experimentais e calculados de condutividade em diferentes frações mássicas de gordura.

$$k_f = \rho_f \left[\frac{0,038}{396} \frac{y_s}{(y_s + 1)} + \frac{0,260}{962} \frac{y_g}{(y_g + 1)} + \frac{0,787}{1023} \frac{y_a}{(y_a + 1)} \right] \quad (3.27)$$

Os valores de condutividade térmica calculados para a farinha seca, para a gordura e para a água foram respectivamente 0,038, 0,260 e 0,787 $W m^{-2} °C^{-1}$. Polinômios para cálculo da condutividade da água e gordura em função da temperatura disponíveis na literatura (ex.; VALENTAS *et al.*, 1997) geram valores de condutividade destes componentes a temperatura ambiente que são da mesma ordem de grandeza dos valores aqui reportados. Este fato, se não confirma definitivamente, apresenta fortes indícios da validade do procedimento investigativo de k_f .

Segundo Rao e Rizvi (2005) a água tem condutividade térmica muito mais elevada que os outros componentes do alimento, o que ocasiona um aumento da condutividade com o incremento da umidade do produto. Resultados apresentados na Figura 4.16 evidenciam esse efeito, pois independente da fração mássica de gordura inicialmente presente na amostra, percebe-se a elevação da condutividade térmica da farinha. Quando a umidade em base seca tende ao infinito a

condutividade térmica do produto tende finalmente ao valor da condutividade da água pura.

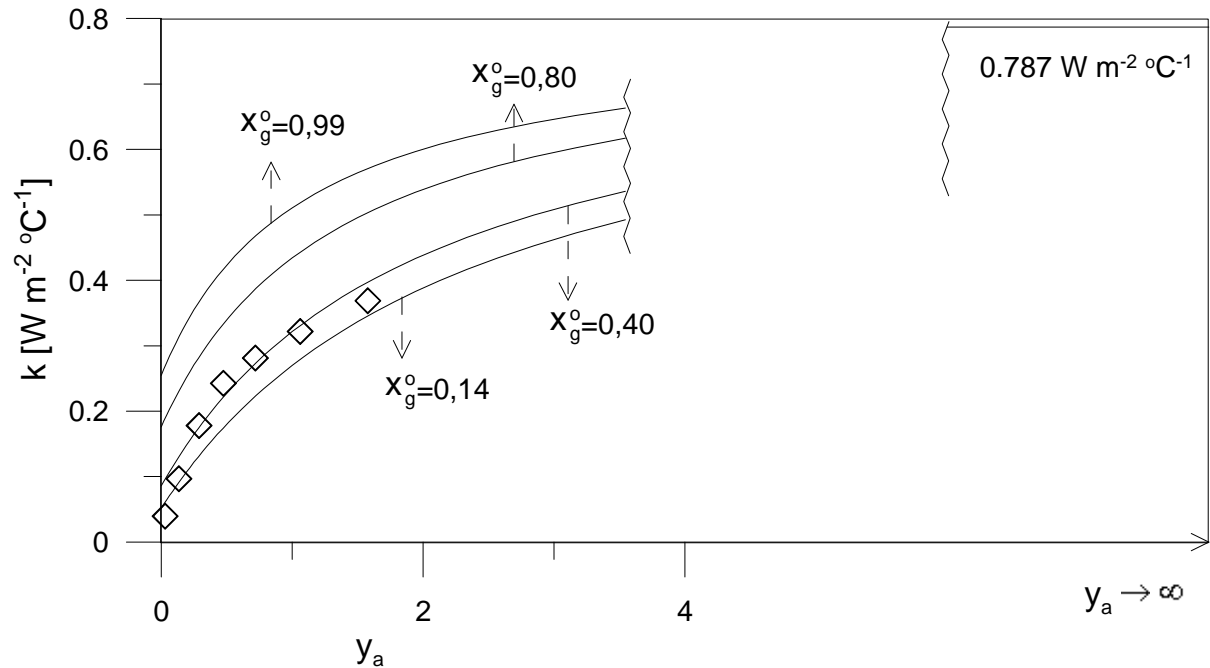


Figura 4.16 – Efeito da fração mássica de água sobre a condutividade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de gordura.

O aumento do conteúdo de gordura também aumenta a condutividade térmica da farinha de resíduos, mas não na mesma proporção da umidade. Entretanto, este efeito ocorre somente até um certo valor limite de fração mássica de água no produto ($< 0,6$). Detalhes da influência simulada da fração mássica de gordura sobre a condutividade térmica da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água, podem ser observados na Figura 4.17.

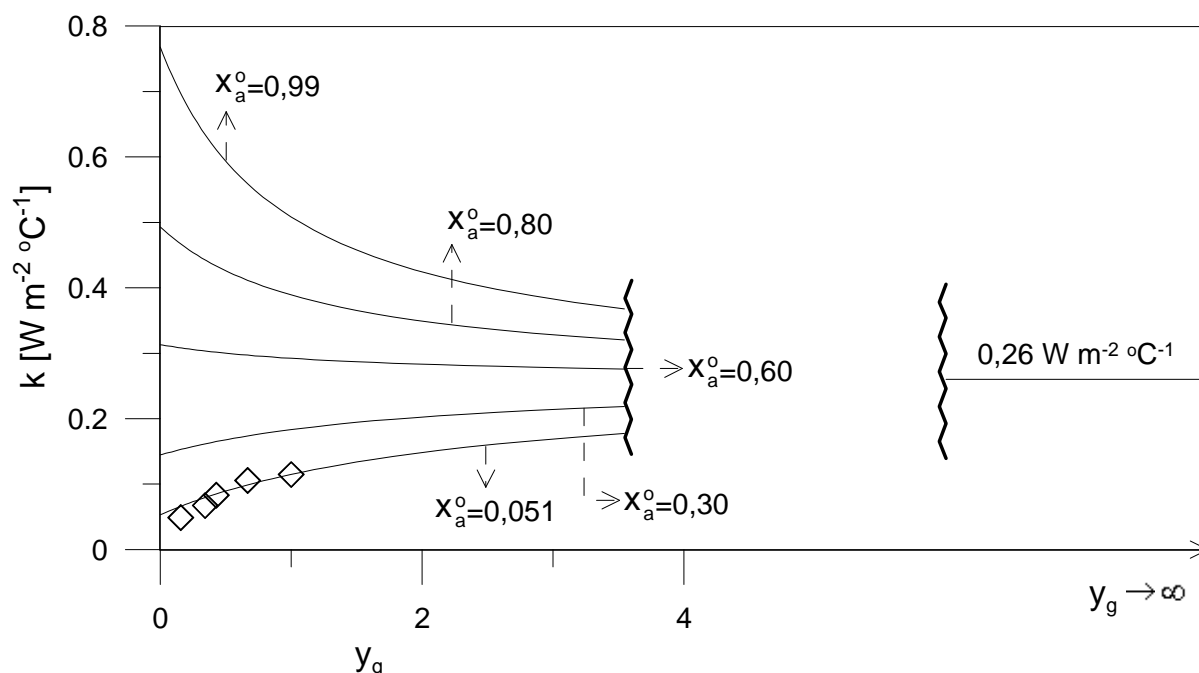


Figura 4.17 – Efeito da fração mássica de gordura sobre a condutividade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água.

Na figura acima os valores experimentais tenderiam ao valor da condutividade da gordura caso um aumento ulterior neste constituinte tivesse sido promovido ($0,26 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Entretanto, devido a necessidade de homogeneidade do material nos ensaios de transferência de calor, a qual seria inatingível com maiores teores de gordura, quando comparados com os ensaios de calor específico e densidade, estes foram os que envolveram menores quantidades deste constituinte.

Cada resultado experimental de condutividade térmica reportado nas Figuras 4.14 a 4.17 foi obtido a partir de experimentos de transferência de calor unidimensional em regime transiente em um cilindro feito com o material investigado. As Figuras 4.18a e 4.18b apresentam a variação da temperatura média adimensional do cilindro ao longo do tempo do ensaio para amostras de farinha com diferentes umidades. As linhas apresentam simulações com as Equações 3.5 e 3.6. Nestes cálculos, o calor específico, a densidade aparente e a condutividade foram estimadas com os modelos propostos nesta investigação.

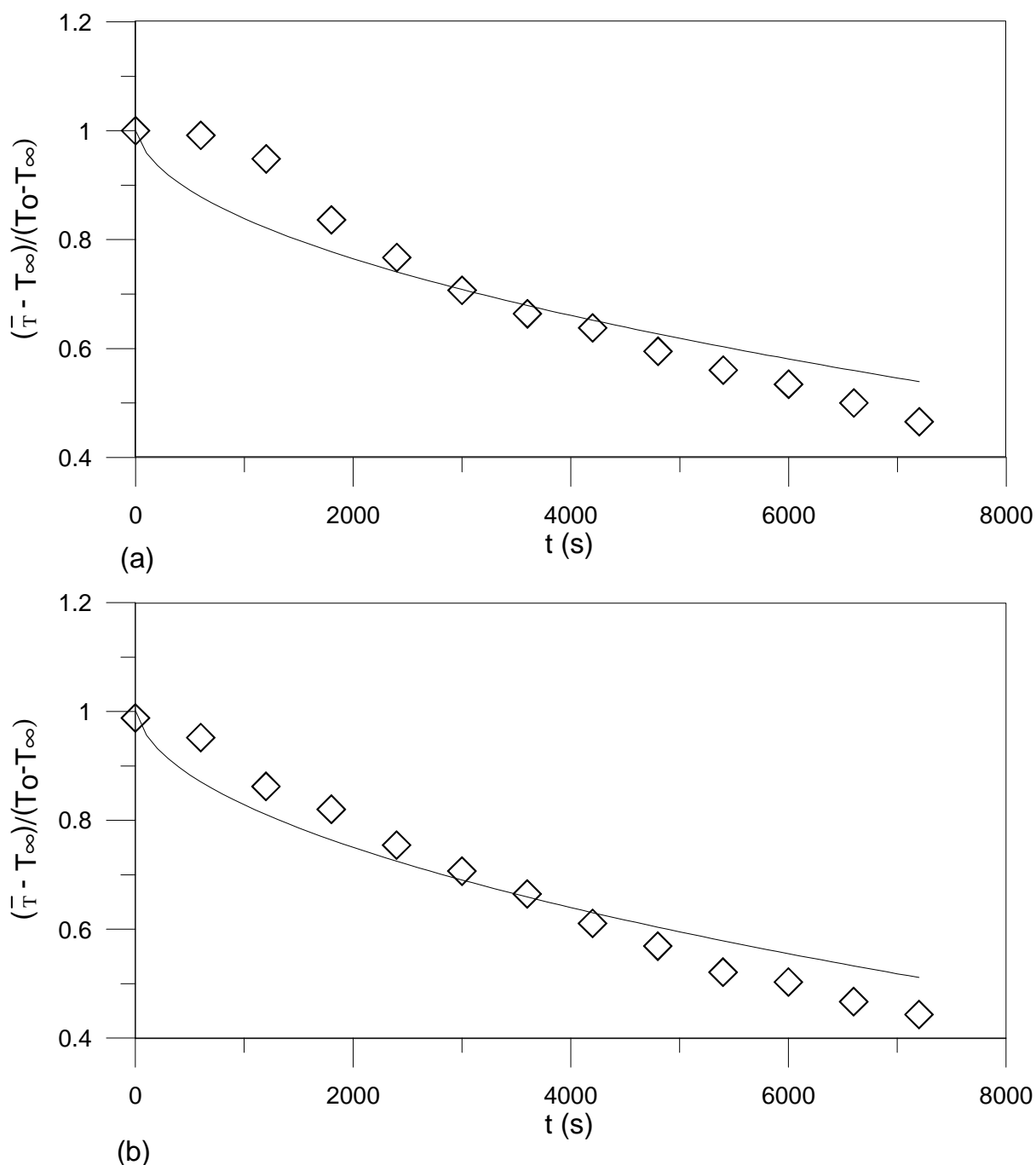


Figura 4.18 – Temperatura adimensional experimental (símbolos) e calculada (linhas) do cilindro de farinha de resíduos (descrito no capítulo de materiais e métodos) ao longo do tempo de ensaio. (a) umidade=3,7% (base úmida); (b) umidade=61,2% (base úmida).

Convém ressaltar que os resultados experimentais e simulados reportados na Figura 4.18 foram obtidos acrescentando-se diferentes quantidades de água a farinha originalmente remetida pela indústria A. Neste sentido, a fração mássica de gordura que na Figura 4.18a era igual a 0,136 foi reduzida para aproximadamente

0,054 na farinha envolvida nos resultados reportados na Figura 4.18b. De qualquer forma, observa-se que o modelo de transferência de calor descreveu corretamente a queda de temperatura no cilindro, apesar da negligência da resistência a transferência de calor por convecção nas extremidades do mesmo.

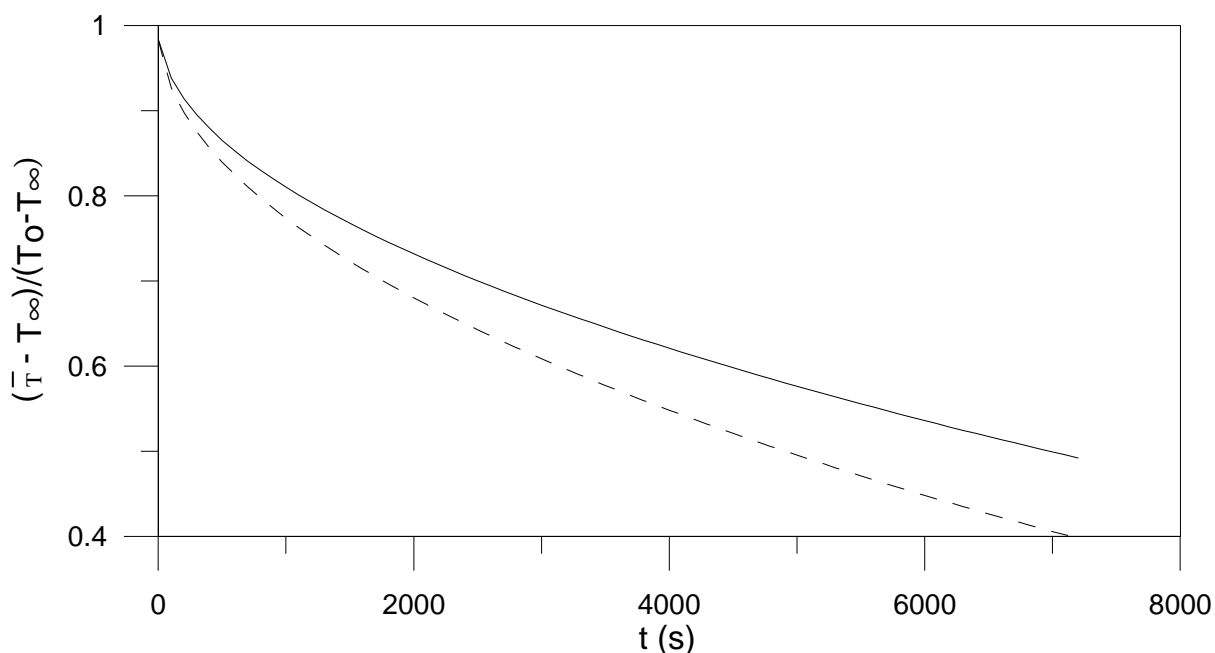


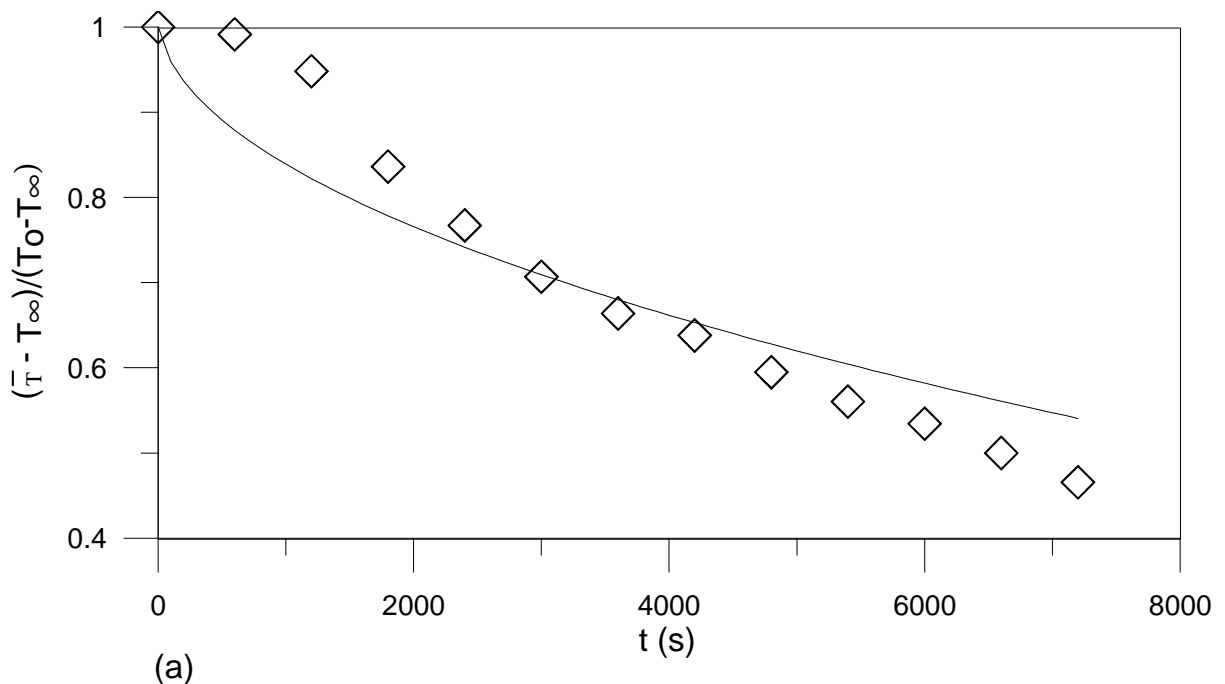
Figura 4.19 – Temperatura média adimensional ao longo do tempo de amostras de farinha de resíduos com diferentes umidades. Linha contínua (1%) e linha tracejada (99%)

A fim de eliminar o efeito combinado de variações de umidade e gordura sobre perfil de temperatura, foram realizadas simulações na ausência de lipídeos, mas considerando diferentes frações mássicas de água. Estes resultados são reportados na Figura 4.19. Observa-se prontamente que a maior condutividade da água, quando comparada com a da matéria seca, provoca um decréscimo de temperatura mais acentuada na amostra de farinha mais úmida.

Os resultados reportados na Figura 4.20 são análogos aos encontrados na Figura 4.18, porém neste caso as diferenças nos perfis são atribuídas a adição de gordura na farinha oriunda da indústria *B*. Novamente, existe um efeito combinado de gordura e umidade sobre a temperatura média adimensional observada ao longo do tempo. Isto ocorre porquê na amostra de farinha utilizada na obtenção dos resultados reportados na Figura 4.20b foi adicionado gordura, o que provocou um aumento da massa total da amostra e conseqüente redução de umidade.

Independente, deste fato a Figura 4.20 é apresentada com intuito de evidenciar a descrição correta dos perfis temporais de temperatura no cilindro em condições completamente distintas no que se refere a composição do material, e em especial a quantidade de gordura.

A Figura 4.21 tem o mesmo propósito da Figura 4.19, mas evidencia o efeito principal do teor de gordura sobre a condução de calor na farinha. Entretanto, quando comparadas as Figuras 4.19 e 4.21, observa-se uma diferença mais marcada entre os perfis, o que é atribuído a maior diferença entre as difusividades térmicas da matéria seca e da gordura quando confrontada com a diferença da mesma propriedade entre a matéria seca e água. O cálculo das difusividades térmicas com a Equação (3.7), envolvendo dados de calor específico, densidade e condutividades da farinha obtidos respectivamente pelas Equações (3.12), (3.19) e (3.27) com parâmetros definidos neste capítulo e frações mássicas destes constituintes reportados nos títulos das Figuras 4.19 e 4.21 corrobora este comportamento.



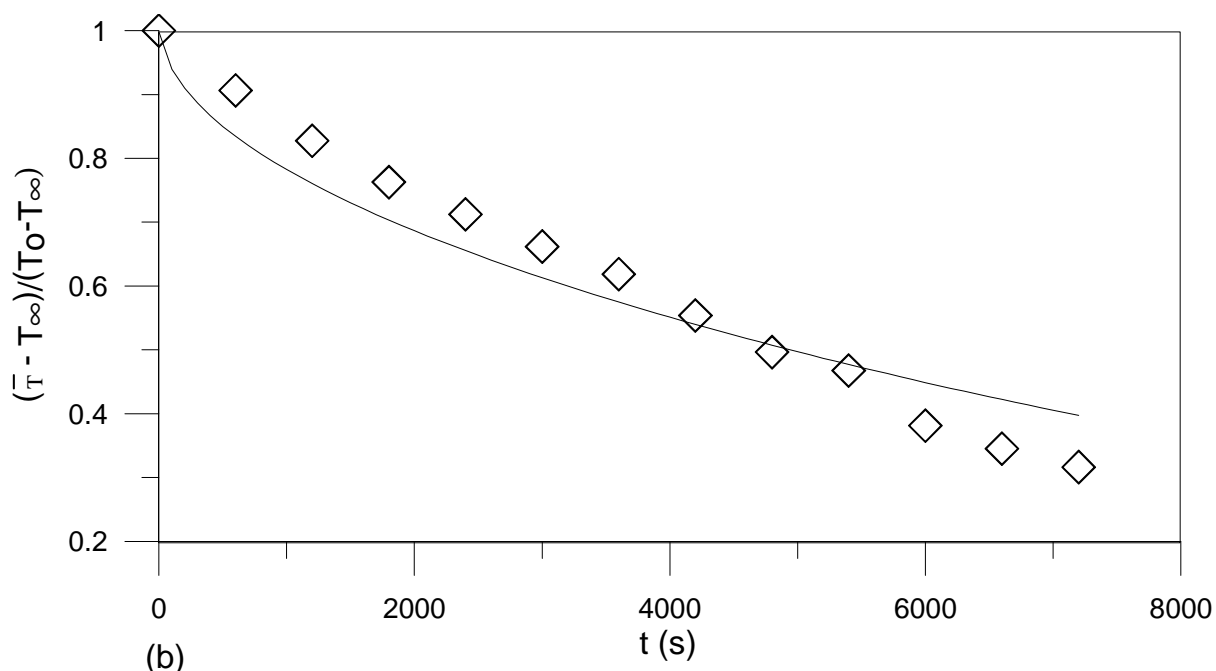


Figura 4.20 – Temperatura adimensional experimental (símbolos) e calculada (linhas) do cilindro de farinha de resíduos (descrito no capítulo de materiais e métodos) ao longo do tempo de ensaio. (a) $x_g=0,255$; (b) $x_g=0,500$.

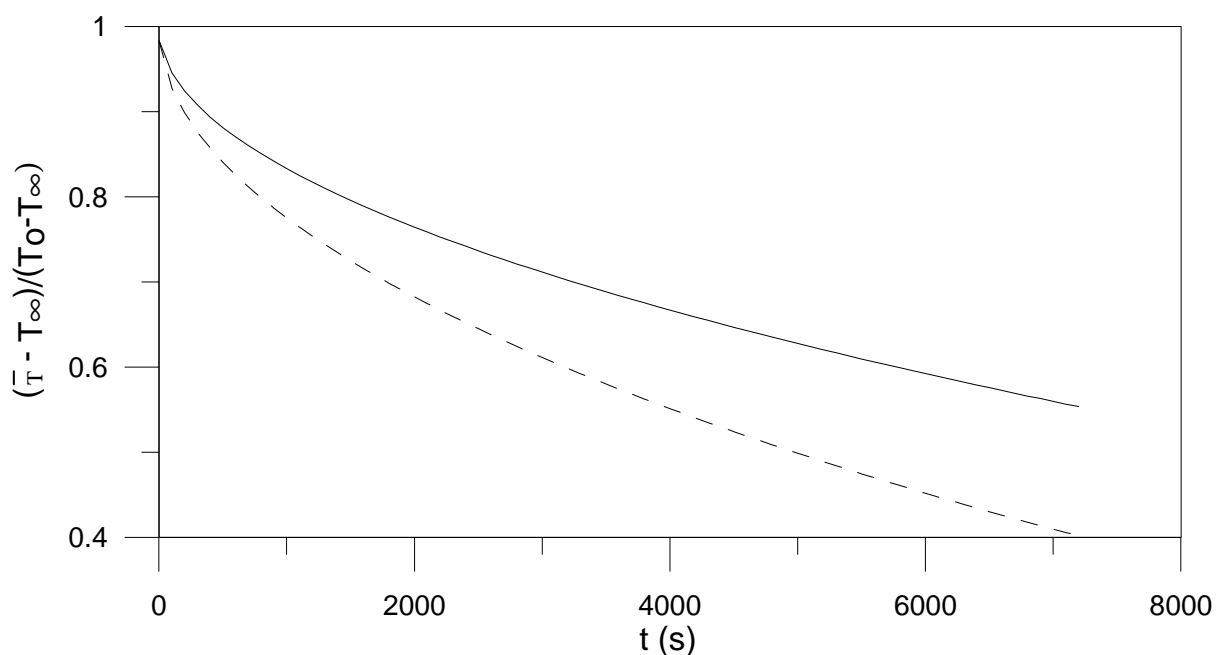


Figura 4.21 – Perfil de temperatura média adimensional ao longo do tempo de amostras de farinha de resíduos com diferentes frações mássicas de gordura. Linha contínua (1%) e linha tracejada (99%)

A Figura 4.22 demonstra o efeito da adição da água sobre a difusividade térmica da farinha de resíduos. Assim como observado em figuras análogas

envolvendo as demais propriedades investigadas, também neste caso foi identificado que no limite superior de umidade a difusividade térmica da farinha tende ao valor da difusividade da água. De maneira análoga, porém em uma condição de baixa umidade, a difusividade da farinha se aproxima do valor da difusividade térmica da gordura, se a farinha apresentar quase que somente gordura na sua composição, e tende ao valor da matéria seca, se o material estiver livre de gordura.

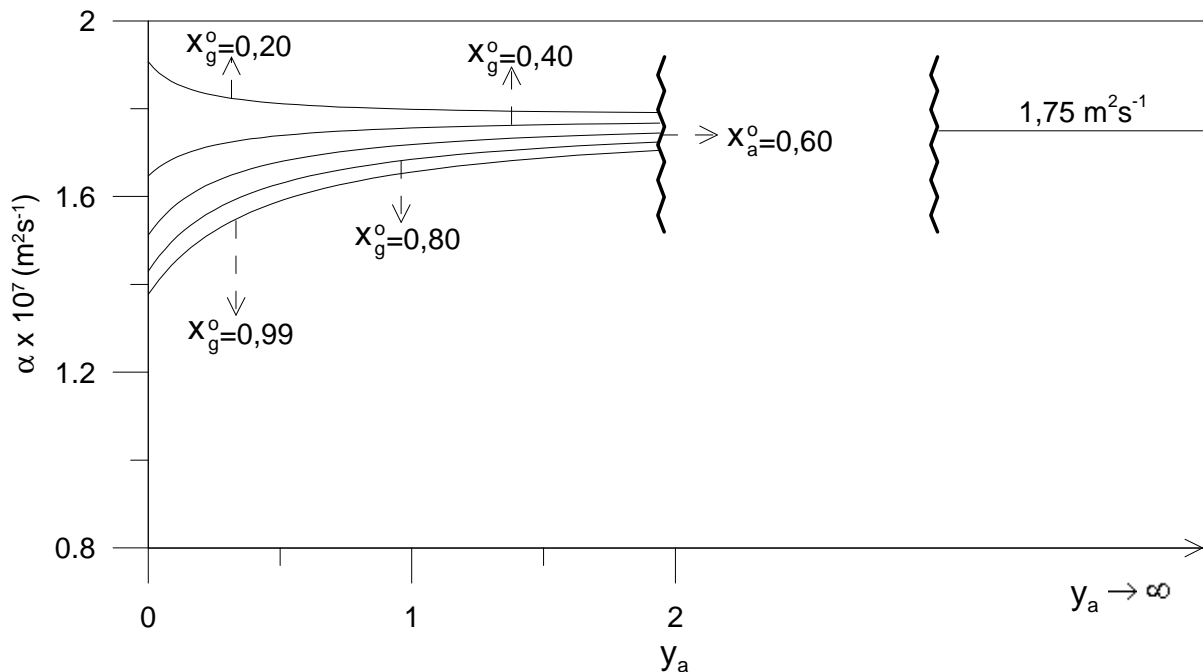


Figura 4.22 - Efeito da fração mássica de água sobre a difusividade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de gordura.

Um diagrama equivalente ao anterior é apresentado na Figura 4.23 a fim de analisar o efeito do aumento da gordura em farinhas com umidades iniciais diferentes. Um comportamento idêntico ao evidenciados nas figuras que abordam a influência deste mesmo fator sobre as variáveis que determinam a difusividade é revelado.

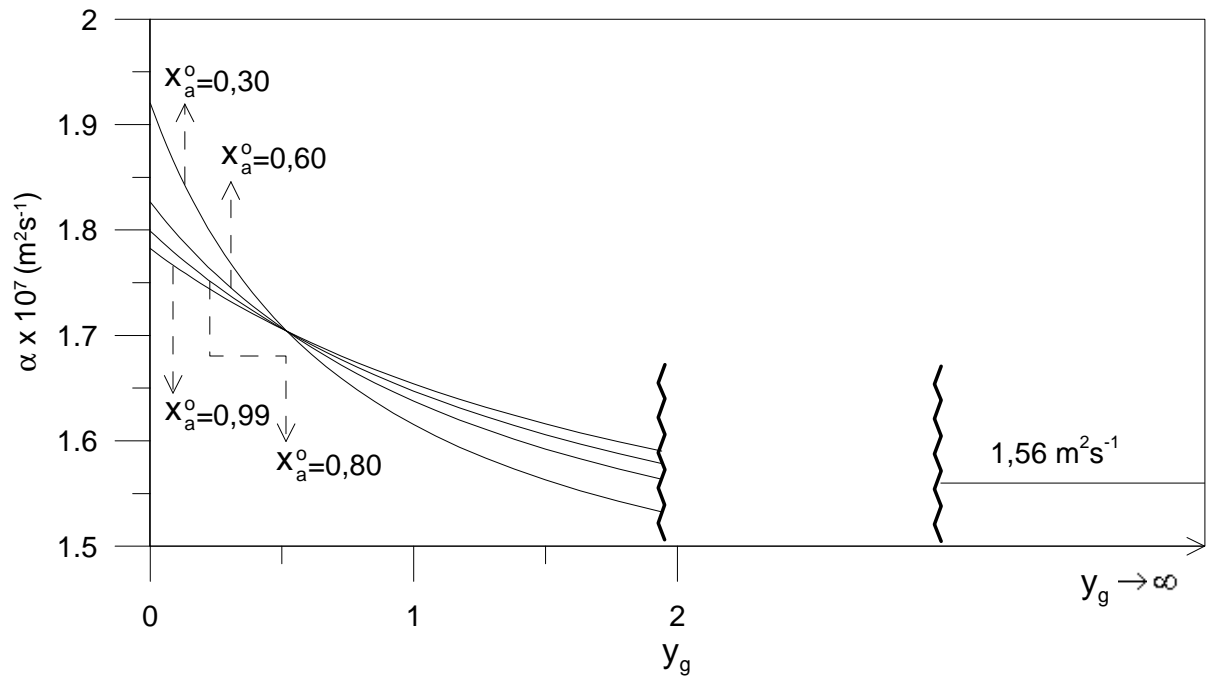


Figura 4.23 – Efeito da fração mássica de gordura sobre a difusividade da farinha de resíduos com diferentes frações mássicas iniciais de água.

5. CONCLUSÕES

Ensaio preliminares realizados com produtos alimentícios de diferentes características, mas em especial no que se refere a umidade, geraram resultados experimentais de calor específico e condutividade térmica que quando comparados com dados reportados na literatura validam os procedimentos e aparato experimental envolvidos na determinação destas propriedades.

O material investigado, constituído de resíduos de indústrias de aves, apresentou conteúdo de umidade de aproximadamente 4% e cinzas de 10%, independente da origem da matéria-prima. Como previamente aguardado, percentuais de proteína superiores a aproximadamente 40% foram encontrados nas amostras remetidas pela indústria A e B, porém com diferenças significativas de conteúdo deste constituinte quando considerada a fonte. A discrepância entre os teores de lipídeos das diferentes unidades processadores de resíduos revela diferenças importantes na operação de prensagem do material pós-processamento com o objetivo de remoção de gordura.

A mesma metodologia, revelou que o material investigado, livre de água e lipídeos, (matéria seca) apresentou um valor de $366 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para o calor específico, 396 kg m^{-3} para a densidade aparente e $0,038 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para a condutividade térmica. Baseados nos elevados valores de todas estas mesmas propriedades para proteína, fibras, e carboidratos, deduziu-se que o material apresenta algum constituinte em importante quantidade que provoca o abaixamento dos valores acima reportados. Este fato enaltece o estudo, pois demonstra que regras de misturas convencionais para predição das propriedades investigadas, baseadas unicamente na composição centesimal do produto, gerariam resultados significativamente diferentes dos revelados nesta investigação.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. T.; COUTO, A. M.; QUEIROZ, D. M.; PEIXOTO, A. B. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.28, n. 3, p. 488-498, 2004.
- ANVISA Decreto nº 343, de 04 de novembro de 1996. Estatui a regulamentação da Inspeção e Reinspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal. Tocantins Brasil. Tecnologia de Produtos para Saúde. Disponível em: <<http://e-legis.anvisa.gov.br>>. Acesso em: 10/06/2009.
- AGRA FNP. **Brazilian livestock & meat industry**. Agra FNP, 2008.
- AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Norma nº 985.19. Washington, 1970. Disponível em: <http://www.aoac.org/oma_revision/toc.htm> Acesso em 08/06/2009.
- ARAUJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. *Ciências Agrotecnologia*, Lavras, v. 28, n. 1, p. 126-134, jan./fev., 2004.
- BAIK, O. D.; SABLANI, S. S.; MARCOTTE, M.; CASTAIGNE, F. Modeling the thermal properties of a cup cake during baking, *Journal of Food Science*, v 64, n. 2, p. 295-299, 1999.
- BAKER, D. H.; BLITENTHAL, R. C.; BOEBEL, K. P.; SOUTHERN, L. L.; WILLIS, G. M. Protein-amino acid evaluation of steam-processed feather meal. *Poultry Science*, n. 60, p. 1865–1872, 1981.
- BARROS, F. D. Reciclagem de resíduos de origem animal: um estudo qualitativo entre processos contínuos e descontínuos e a geração de odores fugitivos. 137 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de processos químicos e bioquímicos) - Escola de engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2007.
- BARROS, F. D e LICCO, E. A. A reciclagem de resíduos de origem animal: uma questão ambiental. 2000.
- BELLAVER, C. Ingredientes de origem animal destinados à fabricação de rações *Simpósio sobre ingredientes na alimentação animal*, Campinas. Colégio Brasileiro de Nutrição Animal, 2001.
- BORÉM, F, M; RIBEIRO, R. C. M. S; CORREA, P. C; PEREIRA, R. G. F.A. Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.475-480, 2002.
- BHARADWAJ, A. S.; BRIGNON, W. R.; GOULD, N. L.; BROWN, P. B. Evaluation of meat and bone meal in practical diets fed to juvenile hybrid striped bass *Morone chrysops* X *M. saxatilis*. *Journal of the World Aquaculture Society*, v. 33, n. 4, p. 448-457, December, 2002.

BLACKADDER, D. A. e NESSERMAN, R. M. **Manual de operações unitárias**. Hemus Editora Ltda. São Paulo, 1982.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Abastecimento. Sindicato Nacional da Indústria de Alimentação Animal. Associação Nacional dos Fabricantes de Rações. **Compêndio brasileiro de alimentação animal**. São Paulo: ANFAR/CBNA/SDR, 2005.

CANHOS, D. A. L.; DIAS, E. L. Tecnologia de carne bovina e produtos derivados. *Ciência e Tecnologia*, São Paulo, p. 440, 1983.

CANSEE, S.; WATYOTHA, C.; THIVAVARNVONGS, T.; URIYAPONGSON, J.; VARITH, J. Effects of temperature and concentration on thermal properties of cassava starch solutions. *Songklanakarin J. Sci. Technol*, v. 30, n. 3, p. 405-411, Jun. 2008.

CHARMI, E. **The fundamentals of food engineering**. AVI Publishing Company Mc., Westport, 1971. p.457.

CHOI, Y. e OKOS, M. R. The thermal properties of tomato juice concentrates. *Transactions of the ASAE*, v. 26, p. 305-311, 1983.

CHOI, Y. e OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on thermal properties of foods. *Food Engineering and Process Applications*, London, v. 1, p. 93–103, 1986.

CORREA, P. C.; ANDRADE, E. T.; JUNIOR, P. C. A. Propriedades térmicas da massa granular de milheto, alpiste e painço: determinação e modelagem. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.6, n.1, p.37-43, 2004.

FERROLI, P. C.; FIOD, M. N.; CASAROTTO, F. N.; CASTRO, J. E. Emissões Zero: Uma Visão da Metodologia ZERI em Fábricas de Subprodutos de Origem Animal. XVII ENEGEP, Anais, Gramado - RS, 1997.

GUMERATO, H. F.; SCHMIDT, F. L.; GOLDONI, J. S. Transferência de calor transiente na agitação linear intermitente de latas. *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 27, n. 3, p. 649-657, jul.-set. 2007.

GUNSTONE, F. D.; NORRIS, F. A. Lipids in foods – chemistry, biochemistry and technology. *Pergamon Press*, p. 105-107, 1983.

HAMDAMI, N.; MONTEAU, J. Y.; BAIL, A. L. Effective thermal conductivity of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures. *International Journal of Refrigeration*, n. 26, p. 809–816, 2003.

HELDMAN, D. R. Prediction of models for thermophysical properties of foods Chap. 1. In: IRUDAYARAJ, J. (Ed.), **Food processing operation modeling: Design and analysis**. New York: Marcel-Dekker, 2001.

HELDMAN, D. R. **Food process engineering**. Westport connecticut, 1975, p. 385.

HELDMAN, D. R. e LUND, D. B. **Handbook of food engineering**. 2nd ed. Taylor & Francis Group, 2007, p. 401.

HELDMAN, D. R., e SINGH, R. P. **Food process engineering**. 2nd ed. Westport, Connecticut: AVI Pub.Co.,1981.

I.A.L. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos. São Paulo, 2004.

JENSON, V. G. e JEFFREYS, G. V. **Mathematical methods in chemical engeneering**. Academic Press Limited. San Diego, 1977.

KALETUNC, G. Prediction of specific heat of cereal flours: A quantitative empirical correlation. *Journal of Food Engineering*. USA, v. 82, p. 589–594, 2007.

KAMAL, A. R. I. **Técnicas experimentais em fenômenos de transferência**. Ed. do autor. Campinas, 2000.

KARIMI, M.; KHEIRALIPOUR, K.; TABATABAEEFAR, KHOUBAKHT, G. M.; NADERI, M.; HEIDARBEIGI, K. The effect of moisture content on physical properties of wheat. *Pakistan Journal of Nutrition*, v. 8, n. 1, p. 90-95, 2009.

KARUNAKAR, B.; MISHRA, S. K.; BANDYOPADHYAY, S. Specific heat and thermal conductivity of shrimp meat. *Journal of Food Engineering*, v. 31, p. 345-351, 1998.

KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. Thermal properties of grain. *Transactions of the ASAE*, v. 8, n. 1, 1965.

KERN, D. Q. **Processos de transmissão de calor**. Guanabara, Dois S. A. Rio de Janeiro, 1980.

LAMB, J. Influence of water on tile thermal properties of foods. *Chemistry and Industry*, v. 24, p. 1046-1048, 1976.

LESSON, S. e SUMMERS, D. J.; **Commercial poultry nutrition**. 2 ed. Guelph, Ontario. Canada: University Books; 1997. p. 350.

LEWIS, M. J. **Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Acribia, 1993. p. 494.

LOZANO, J. E. Thermal properties of foods. In: CANOVAS, G. V. B. (Ed.), **Encyclopedia of life support systems food engineering** EOLSS: UNESCO, 2005. p. 45–64.

MAGDELAINE, P. Economy and prospects of the egg, poultry and rabbit meat sectors in France and European Union. *Productions Animales*, v.16, n. 5, p. 349-356, 2003.

MEEKER, D. L. North american rendering - processing high quality protein and fats for feed. *Brazilian Journal of Animal Science*, n. 38, p. 432-443, 2009.

MOURA, S. C. S. R.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, A. M. C. B. Propriedades termofísicas de soluções-modelo similares a sucos - parte II. *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 25, n. 3, p. 454-459, jul.-set. 2005.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of food and agricultural materials**. New York, Science Publishers, 1980. p.742.

MOURA, S. C. S. R.; VITALI, A. A.; FRANÇA, V. C. L. Propriedades termofísicas de soluções modelo similares a creme de leite. *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 21, n. 2, p. 209-215, maio-ago. 2001.

OCKERMAN, H. W.;HANSEN, C. L. **Industrialización de subproductos de origen animal**. Tradução de Francisco León Crespo. Zaragoza: Editorial Acribia, 1994. p. 387.

PARDI, M. C. **Ciência, higiene e tecnologia da carne**. Goiânia: CEGRAF-UFG, 1993. v. 1, p. 586.

PEACOCK, S. Predicting physical properties of factory juices and syrups. *International Sugar Journal*, v. 97, p. 1162, 1995.

PELEG, M. Physical characteristics of food powders. In **Physical properties of foods**. AVI Publ.Co., Westport, Connecticut. 1993.

PHIPPS, L. W. The interrelationship of the viscosity, fat content and temperature of cream between 40°C and 80°C. *J. Dairy Res.*, n. 36, p. 417-426, 1969.

PROKOP, W. H. Food and agricultural industry. In: BUONICORE, A. J.; DAVIS, W. T. **Air pollution engineering manual**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. p.554-570.

QUEIROZ, G. M. Determinação de propriedades termofísicas do pão tipo francês durante processo de assamento. 179 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

RAHMAN, M. S. **Food properties handbook**. New York, CRC Press, 1995.

RAHMAN, M.S. Mass-volume-area-related properties of food. In: RAO, M. A.; RIZVI, M. D.; DATTA, A. K. **Engineering properties of foods**. New York, Inc, 2005.

RAHMAN, M. S.; CHED, X. D.; PERAIRA, C. O. An improved thermal conductivity prediction model for fruits and vegetables as a function of temperature, water content and porosity. *Journal of Food Engineering*, v 31, p. 163-170, 1997.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. 3rd ed. Taylor & Francis Group, 2005. p.154.

RAPUSAS, R. S.; DRISCOLL, R. H.; SRZEDNICKI, G. S. Bulk density and resistance to airflow of sliced onions. *Journal of Food Engineering*. v. 26, p. 67-8, 1995.

REIDY, G. A.; RIPPEN, A. L. Methods for determining thermal conductivity in foods. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v. 14, n. 2, p. 248-254, 1971.

RENDERERS. Description of a continuous rendering system, 2006. Disponível em: <http://nationalrenderers.org/assets/flow_charts.pdf>. Acesso em 08 de janeiro de 2010.

RESENDE, J. V.; SILVEIRA, Jr. V. Medidas da condutividade térmica efetiva de modelos de polpas de frutas no estado congelado. *Ciências e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 22, n. 2, p. 177-183, maio-ago. 2002.

RIBEIRO, D. M.; CORREA, P. C.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Propriedades térmicas de grãos de trigo: determinação e modelagem. *Ciências Agrotecnologia*, Lavras, v. 31, n. 2, p. 462-467, mar./abr., 2007.

RIBEIRO, V. S.; SOBRAL, M. C.; AMEIDA, M. M.; SILVA, G. F. Propriedades físicas de produtos agrícolas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.4, n.1, p.1-6, 2002.

RIEDEL, L. Eine formel zur berechnung der enthalpie fettarmer lebensmittel in abh ngigkeit von wassergehalt und temperature. *Bureau of Standards Journal of Research*, n. 5, p.129–133, 1978.

RIEDEL, L. Measurements of the thermal conductivity of sugar solutions, fruit juices and milk. *Chem. Ing. Tech.*, n. 21, p. 340, 1949.

SARRIA, S. D. e HONÓRIO, S. L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica* L.) “roxo de valinhos”. *Engenharia. Agrícola.*, Jaboticabal, v.24, n.1, p.185-194, jan./abr. 2004.

SASSERON, J.L. Avaliação de propriedades físicas e curvas de secagem, em camadas finas, de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao* L.). 61 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: 1984.

SHMALKO, M. E.; MORAWICKI, R. O.; RAMALLO, L. A. Simultaneous determination of specific heat and thermal conductivity using the finite-difference method. *Journal of Food Engineering*, n.31, p. 531–540, 1996.

SHORT, A. L. The temperature coefficient of expansion of raw milk. *J. Dairy Res.*, n. 22, p. 769, 1955.

SELL, N. J. **Industrial pollution control: issues and techniques**. 2nd Ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. p. 303-312.

SIBIEL, J. E. Specific heat of various products. *Ice Refrig.*, n. 2, p. 256-257, 1982.

SIMÕES, M. R. e MURR, F. E. X. Determinação da difusividade térmica da polpa de manga. *Acta Scientiarum*, v. 22, n. 5, p. 1225-1228, 2000.

SIMÕES, M. R. Propriedades termofísicas da polpa de manga. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, 1997.

SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*, Chicago, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.

SINGH, R. P. e HELDMAN, D. R. **Introduction to food engineering**. 2nd Ed. New York. Academic press. 1993.

STANLEY, E. e CHARM, S.D. **The fundamentals of food engineering**. 2nd ed. The avi publishing company, inc. 1971. p. 601.

STOLF, S. R. Medição da condutividade térmica dos alimentos. *Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos*, Campinas, n. 29, p. 67-79, 1972.

SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In RAO, M. A. e RIZVI, S. S. H. **Engineering Properties of Foods**. Marcel Dekker, Inc., New York, 1986;

SWEAT, V. E. Experimental values of thermal conductivities of selected fruits and vegetables. *Journal of Food Science*, Chicago, n.39, p.1081-3, 1974.

THE BSE INQUIRY. Industry process and controls: manufacturing of rendering. The BSE Inquiry: The Report. Uk, 2001. Disponível em: <<http://www.dseinquiry.bov.uk>>. Acesso em 08 de Janeiro de 2010.

UEKI, Y. Export-Led growth and geographic distribution of the poultry meat industry in brazil. *Institute of Developing Economies*, n. 67, p. 1-35, 2006.

USEPA. Meat Rendering Plants. In Emission factor documentation for AP-42 section 9.5.3, EPA contract n 68-D2-0159, Midwest research Institute, Kansas City, MO, set. 1995. Disponível em:<<http://www.epa.gov>>. Acesso em 08 de Janeiro de 2010.

VALENTAS, K. J.; ROTSTEIN, E.; SINGH, R. P. **Handbook of food engineering practice**. CRC press, New York, 1997.

VIEIRA, J.A.G. Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar de suco de laranja em tubos. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas.1996.

ZANOELO, E. F.; BENINCÁ, C.; RIBEIRO, E. Thermophysical properties of mate leaves: experimental determination and theoretical effect of moisture content. *Journal of Food Process Engineering*, In press, 2010.

ZILL, D. G. e CULLEN, M. R. **Differential Equations with Boundary-Value Problems**, 3rd Ed., PWS Publishing Company,1989.

WANG, X. e PARSONS, C. M. Effect of processing systems on protein quality of feather meals and hog hair meals. *Poultry Science*, n. 76, p. 491–496, 1997.

WARK, K e WARNER, C. F. Air pollution its origin and control. Harper & Row Publishers, New York, p. 465-483, 1976.

WELTY, J. R.; WICKS, J. E.; WILSON, R. E. **Fundamentals of Momentum, Heat and mass Transfer**, 3rd Ed., John Wiley and Sons.1984.

WHEELLOCK, T. D. e LANCASTER, E. B. Thermal properties of wheat flour. *Die Starke*, n. 22, p. 44–48, 1970.

WINDHORST, H. W. Changes in poultry production and trade worldwide: Worlds. *Poultry Science Journal*, n. 62, p. 585-602, 2006.

WYLIE, C. R. e BARRET, T. C. **Advanced Engineering Mathematics**, Mc-Graw-Hill, 1985.